

Vinícius Pierri dos Santos

**INFLUÊNCIA DO GRADIENTE DE TEMPERATURAS NA
ESTIMATIVA DA VIDA À FADIGA DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO**

Florianópolis

2018

Vinícius Pierri dos Santos

**INFLUÊNCIA DO GRADIENTE DE TEMPERATURAS NA
ESTIMATIVA DA VIDA À FADIGA DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Victor Staub de Melo

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra

Santos, Vinícius Pierri dos
Influência do gradiente de temperaturas na estimativa
da vida à fadiga do revestimento asfáltico / Vinícius Pierri
dos Santos ; orientador, João Victor Staub de Melo, 2018.
77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Asfalto. 3. Fadiga. 4. Gradiente
de temperaturas. I. Melo, João Victor Staub de.
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

Vinicius Pierri dos Santos

**INFLUÊNCIA DO GRADIENTE DE TEMPERATURAS NA ESTIMATIVA DA VIDA
À FADIGA DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO**

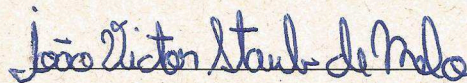
Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Grau de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 04 de dezembro de 2018.

Prof.^a Luciana Rohde, Dr.^a

Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Prof. João Victor Staub de Melo, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Lucas Torres de Rosso

Universidade Federal de Santa Catarina / PPGEC

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e incentivo durante todos os anos de formação.

Ao meu orientador, professor Dr. João Victor Staub de Melo, pela organização, empenho e paciência despendidos na produção deste trabalho.

Aos membros da banca, Dr. Rafael Higashi e Eng. Lucas Torres de Rosso, por se disponibilizarem a avaliar e enriquecer este trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina e seu corpo docente, pela qualidade de ensino e pelo desenvolvimento humano proporcionados ao longo da graduação.

Aos amigos, em especial à Ana, Beatriz, Camila, Luiza e Maria por trilharem o caminho ao meu lado.

Muito obrigado!

RESUMO

O sistema de transportes brasileiro tem o modal rodoviário como principal meio, tanto para cargas quanto para passageiros e apenas 12,3% dessas estradas estão pavimentadas. Apesar da sua importância, as condições de tráfego nas vias estão muito abaixo do esperado para uma utilização segura e confortável. Faz-se necessário um maior aprofundamento nos fenômenos de degradação do pavimento das rodovias brasileiras. A fadiga devido a repetição de carregamento é um processo de dano cumulativo e uma das principais causas de perda estrutural em pavimentos flexíveis. O presente trabalho aborda um dos principais influenciadores da resistência à fadiga do revestimento asfáltico: a temperatura. O objetivo principal proposto é a avaliação da vida à fadiga de um revestimento asfáltico sob a atuação de um gradiente de temperaturas. Foi utilizado um modelo matemático baseado em dados climatológicos dos anos de 2017 e 2018, da cidade de Araranguá para obter o perfil de temperatura. A previsão de desempenho do material asfáltico à fadiga baseou-se na abordagem fenomenológica. Fez-se uso de ensaios laboratoriais realizados por Melo (2014) e Pereira (2017) no aparato de flexão a quatro pontos nas temperaturas de 4, 15 e 20 °C, utilizando o critério de ruptura convencional e deformação controlada. Simulações numéricas da estrutura do pavimento foram realizadas em diferentes datas do período de estudo para avaliar como a sazonalidade e o gradiente de temperaturas interfere na vida de fadiga do revestimento asfáltico. Constatou-se que a equação utilizada para obter o perfil térmico do revestimento fornece dados coerentes para as temperaturas máximas do revestimento. Observou-se também que as simulações numéricas indicam a suscetibilidade térmica da mistura asfáltica, apresentando maior resistência à fadiga sob um perfil de temperaturas variável quando comparadas às simulações sob a temperatura média do gradiente. Quanto à avaliação das diferentes estações do ano, o desempenho do revestimento à fadiga é máximo no Inverno e mínimo no Verão. O dimensionamento racional de um pavimento rodoviário com revestimento asfáltico deve considerar o gradiente de temperaturas como parâmetro influente na vida à fadiga do pavimento.

Palavras-chave: Revestimento asfáltico. Fadiga. Gradiente de temperatura.

ABSTRACT

The Brazilian transportation system has roadways as main mean of transport for both: cargo and passenger. Only 12,3% of this roads are paved. Despite of its importance, the traffic condition is bellow-expected for comfort and safety usage. It requires a closer look to the deterioration phenomenon of Brazilian paved roadways. Fatigue due to repeated traffic loading is a process of cumulative damage and one of the principal failure modes of flexible pavement structures. This study discusses one of the main influences in the fatigue resistance of asphalt mixtures: the temperature. The study central focus is the evaluation of the fatigue resistance in a flexible structure pavement undergoing thermal gradients. The pavement temperature profile is obtained through a mathematical model based on weather reports from Araranguá in between 2017 and 2018. The prediction of fatigue resistance for the asphalt mixture is oriented in a phenomenological approach. The asphalt concrete data comes from laboratory tests performed by Melo (2014) and Pereira (2017) on the four point flexural apparatus at the temperatures of 4, 15, and 20 °C using the conventional criteria of rupture. Numerical simulations of the pavement structure were performed in different times of the year to evaluate the influence of seasonality in the fatigue resistance performance. It was found that the equation used to obtain de thermal gradient provides consistent data to the maximum temperature on the asphalt mixture. Also, the simulations points to the thermal susceptibility of asphalt mixtures, showing a better performance of the flexible pavement when it's submitted to a temperature variable when compared to simulation with uniform temperature. About seasonality influence, the best overall performance is obtained in the Winter, and the worst performance was calculated in Summer. A rational assess and designing of asphalt pavement structures has to consider the thermal gradients as an influent parameter in the fatigue-life prediction.

Keywords: Asphalt Mixture. Fatigue. Thermal Gradient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Função tridimensional da viscoelasticidade.....	20
Figura 2: Fluência a tensão constante.....	21
Figura 3: Relaxação a deformação constante	21
Figura 4: Representação das curvas de tensão e deformação com o ângulo de fase	22
Figura 5: Representação analógica do modelo Huet-Sayegh	25
Figura 6: Esquema de solicitações no concreto asfáltico com a passagem de um eixo	26
Figura 7: Estágios do processo de fadiga	27
Figura 8: Seções da amostra no ensaio em 4 pontos	28
Figura 9: Variação horária da temperatura do ar e do revestimento asfáltico em diferentes profundidades	31
Figura 10: Comparação entre a predição da temperatura do pavimento com a equação do Superpave e medição instrumentada a 2 cm de profundidade.....	33
Figura 11: Aparato de teste a quatro pontos	38
Figura 12: Configuração de carregamento (semieixo de roda dupla)	40
Figura 13: Fluxograma representativo das simulações realizadas.....	42
Figura 14: Divisão em camadas do revestimento asfáltico para tomadas do perfil de temperaturas.....	43
Figura 15: Constituição da plataforma de pavimento utilizada na simulação numérica.	46
Figura 16: Composição granulométrica da mistura de agregados.....	48
Figura 17: Placa (60 cm x 40 cm x 9cm) resultante da compactação	50
Figura 18: Projeção dos corpos de prova sobre a placa de concreto	51
Figura 19: Plano complexo Cole-Cole	52
Figura 20: Modelo de fadiga segundo a abordagem fenomenológica.....	54
Figura 21: Modelo de fadiga geral segundo a abordagem fenomenológica.....	55
Figura 22: Influência da variação sazonal no perfil de temperaturas	60
Figura 23: Entrada dos dados da estrutura e do gradiente de temperaturas no <i>Viscoroute 2.0</i> ..	61
Figura 24: Dados do carregamento do pavimento no <i>ViscoRoute 2.0</i>	61
Figura 25: Apresentação do valor crítico de microdeformações no <i>ViscoRoute 2.0</i> para simulação realizada com gradiente de temperaturas para a primavera	62
Figura 26: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob gradiente de temperaturas na Primavera	63

Figura 27: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob média do gradiente de temperaturas na Primavera	64
Figura 28: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob gradiente de temperaturas no Verão.....	64
Figura 29: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob média do gradiente de temperaturas no Verão.....	65
Figura 30: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob gradiente de temperaturas no Outono.....	65
Figura 31: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob média gradiente de temperaturas no Outono.....	66
Figura 32: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob gradiente de temperaturas no Inverno	66
Figura 33: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob média do gradiente de temperaturas no Inverno	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedade dos agregados minerais	47
Tabela 2: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico	48
Tabela 3: Características da dosagem com teor de ligante de 4,35%.....	49
Tabela 4: Parâmetros viscoelásticos do modelo de Huet-Sayegh utilizados na simulação	52
Tabela 5: Determinação da ruptura e número de ciclos segundo o critério convencional	53
Tabela 6: Dados climáticos coletados para a utilização na equação de Barber.....	57
Tabela 7: Parâmetros físicos utilizados no modelo	58
Tabela 8: Temperaturas do pavimento calculadas para às 12:00 h - Primavera e Verão	59
Tabela 9: Temperaturas do pavimento calculadas para às 12:00 h - Outono e Inverno.....	59
Tabela 10: Microdeformações de tração críticas do revestimento para as 12:00 h para as diferentes simulações realizadas.....	62
Tabela 11: Vida de fadiga segundo a abordagem fenomenológica	68
Tabela 12: Dados meteorológicos de 07/11/2017 e 03/02/2018	76
Tabela 13: Dados meteorológicos de 05/05/2018 e 08/08/2018	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

BR 101 – Rodovia Governador Mário Covas

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CNT – Confederação Nacional de Transportes

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

EN – Europäische Norm

IFSTTAR – Institut français des sciences et Technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

NBR – Norma Brasileira Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A.

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
2	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
2.1	REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	16
2.2	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ASFÁLTICO	17
2.3	RIGIDEZ DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	19
2.4	COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	19
2.4.1	Domínio Temporal	20
2.4.2	Domínio Freqüencial e o Módulo Complexo	21
2.5	MODELOS VISCOELÁSTICOS	24
2.5.1	Modelo de Huet-Sayegh (1965)	24
2.6	FADIGA DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS	26
2.6.1	Ensaio de fadiga	27
2.6.1.1	Ensaio de flexão em viga quatro pontos.....	28
2.6.2	Método de análise do comportamento a fadiga	28
2.6.2.1	Abordagem fenomenológica	29
2.6.3	Critérios de ruptura	29
2.6.3.1	Critério convencional de ruptura.....	30
2.7	A TEMPERATURA DOS PAVIMENTOS.....	30
3	METODOLOGIA	34
3.1	DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO	35
3.1.1	Caracterização dos materiais empregados na mistura asfáltica.....	35
3.1.1.1	Agregados Minerais	36
3.1.1.2	Ligante Asfáltico	37

3.1.2	Dosagem da mistura asfáltica.....	37
3.1.3	Avaliação da resistência à fadiga e do comportamento reológico da mistura asfáltica.....	37
3.1.4	Parâmetros dos materiais constituintes da estrutura do pavimento	38
3.1.5	Configuração do carregamento.....	39
3.2	COLETA DE DADOS METEOROLÓGICOS	40
3.3	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E DEFINIÇÃO DO GRADIENTE DE TEMPERATURAS NO REVESTIMENTO ASFÁLTICO	41
3.4	OBTENÇÃO DA MICRODEFORMAÇÃO DE TRAÇÃO	43
3.5	OBTENÇÃO DA VIDA À FADIGA SEGUNDO A ABORDAGEM FENOMENOLÓGICA.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO.....	45
4.1.1	Caracterização dos materiais empregados na mistura asfáltica.....	46
4.1.1.1	Agregados minerais.....	46
4.1.1.2	Composição Granulométrica.....	47
4.1.1.3	Ligante Asfáltico	48
4.1.1.4	Dosagem da mistura asfáltica.....	49
4.1.1.5	Avaliação da resistência a fadiga e do comportamento reológico da mistura asfáltica	49
4.1.1.5.1	<i>Resistência à fadiga – Critério Convencional</i>	<i>52</i>
4.1.1.5.2	<i>Obtenção da curva de fadiga pela abordagem fenomenológica.....</i>	<i>54</i>
4.2	COLETA DE DADOS METEOROLÓGICOS	56
4.2.1	Fatores climáticos	56
4.2.2	Propriedades físicas do pavimento	57
4.3	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E DEFINIÇÃO DO GRADIENTE DE TEMPERATURAS NO REVESTIMENTO ASFÁLTICO	58
4.4	OBTENÇÃO DA MICRODEFORMAÇÃO DE TRAÇÃO	60

4.5	OBTENÇÃO DA VIDA À FADIGA SEGUNDO A ABORDAGEM FENOMENOLÓGICA.....	67
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
5.1	RECOMENDAÇÕES	69
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A – Dados meteorológicos de 07/11/2017 e 03/02/2018.....	76
	APÊNDICE B – Dados meteorológicos de 05/05/2018 e 08/08/2018.....	77

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária é a principal responsável pela integração territorial e de todo o sistema de transporte no país, com participação de mais de 61% na matriz de transporte de cargas e de 95% na de passageiros (CNT, 2017). De acordo com o mesmo levantamento realizado pela Confederação Nacional dos Transportes, o Brasil possui apenas 12,3% da sua malha rodoviária pavimentada. Esses dados demonstram a necessidade, presente e futura, de investimentos na infraestrutura de rodovias do país.

Enquanto métodos mecanicistas de projeto e avaliação estrutural do pavimento foram desenvolvidos e aplicados em países como França e Estados Unidos, no Brasil a metodologia utilizada para o dimensionamento de pavimentos flexíveis baseia-se, até o presente momento, em conceitos empíricos e parâmetros ultrapassados. Estudos e pesquisas em pavimentação, voltados para as condições climáticas e materiais brasileiros, buscam modificar este cenário para promover a qualidade, segurança e durabilidade nas rodovias do país (COUTINHO, 2011; FRANCO, 2007).

Para os pavimentos de concreto asfáltico, empregados na maioria dos segmentos executados no Brasil e no mundo (ALMEIDA, 2017), os principais processos que levam à degradação são: as deformações permanentes e a trincas por fadiga. Pinto (1991) aponta o trincamento devido a fadiga das camadas de revestimento como o defeito predominante dos pavimentos asfálticos brasileiros. O tráfego, o gradiente de temperaturas e a água promovem, segundo Castañeda Pinzon (2004), ações deletérias na mistura asfáltica em países de clima quente e úmido.

Dentre as normas disponíveis para a realização dos ensaios de fadiga nas misturas asfálticas (ASTM D7460, AASHT T321 e EN 12697-24, por exemplo) não há consenso na definição de parâmetros relevantes, como a temperatura, frequência e tipo de carregamento ou critério de ruptura (PINTARELLI, 2017). Isso se deve à complexidade das características mecânicas do material, à variabilidade do carregamento em serviço, à influência dos fatores externos e à diferentes abordagens do processo de degradação.

O uso de simulação computacional na engenharia possibilita averiguar o comportamento de corpos submetidos aos mais diversos fenômenos físicos. A solução numérica de um modelo oferece uma resposta confiável para problemas complexos, de difícil solução analítica. Essa ferramenta vem sendo empregada em projetos de rodovias para o dimensionamento das camadas que compõe o pavimento (CHABOT et al., 2010).

A utilização de um método racional para a concepção estrutural do pavimento asfáltico passa pela avaliação da resistência à fadiga da mistura utilizada. Neste contexto, a compreensão dos parâmetros ambientais no desempenho do material, como é da influência do gradiente de temperaturas, é relevante para o correto dimensionamento da estrutura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do gradiente de temperaturas na vida à fadiga do revestimento asfáltico sob uma ótica fenomenológica.

1.1.2 Objetivos específicos

Visando a realização do objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram elencados:

- Selecionar uma localidade com rodovia implantada, a qual disponha de dados meteorológicos, de ensaios dos materiais da estrutura do pavimento e de tráfego;
- Obter dados climáticos da área no período de 1 ano, em especial a temperatura do ar, velocidade de vento e radiação solar;
- Calcular a variação com a profundidade da temperatura do revestimento asfáltico, para diferentes estações do ano na hora da temperatura crítica do revestimento;
- Obter dados de resistência à fadiga da mistura asfáltica utilizada na rodovia selecionada, efetuados nas temperaturas de 4 °C, 15 °C e 20 °C, utilizando o critério de ruptura convencional;
- Plotar curva de fadiga unificada segundo a abordagem empregada;
- Fazer a estimativa da vida útil do revestimento asfáltico empregando os diferentes gradientes de temperatura obtidos, comparando com o emprego da temperatura média do gradiente. Para tanto utiliza-se o *Software ViscoRoute 2.0* e a equação de fadiga obtida;
- Avaliar como a consideração da variação de temperatura interna do revestimento asfáltico modifica a predição a vida à fadiga.

2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A pavimentação de uma via de circulação de veículos promove diretamente, a melhoria operacional para o tráfego, com a criação de uma superfície mais regular, que garante o conforto no deslocamento do veículo; uma superfície mais aderente, com maior segurança em condições de pista úmida ou molhada e uma superfície menos ruidosa sob ação dinâmica dos pneumáticos, possibilitando conforto ambiental em vias urbanas e rurais (BALBO, 2007).

O pavimento é uma estrutura formada por um conjunto de camadas sobrepostas, construída sobre a superfície final de terraplenagem. Deve suportar as tensões impostas pelo tráfego de veículos e pelas ações climáticas durante um período determinado de tempo (IBARRA, 2003).

As características estruturais do pavimento estão diretamente relacionadas com os materiais empregados em suas camadas e com sua espessura. A classificação geral dos pavimentos se dá, principalmente, pelo tipo de revestimento e com a forma de distribuição de esforços e deformações gerados pelo tráfego. A classificação e definição é fornecida no Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (BRASIL, 2006):

Flexível: aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica.

Semirrígido: caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

Rígido: aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Exemplo típico: pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

2.1 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Segundo Bernucci et al. (2008), o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada final, que se destina a receber a carga dos veículos e, de maneira mais direta, a ação climática. Essa camada deve ser assim, tanto quanto possível, impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que variam conforme a carga e a velocidade do veículo.

Medina & Motta (2005) destacam ainda que o revestimento, além de evitar a infiltração de água nas camadas inferiores e resistir aos esforços horizontais atuantes na

estrutura, deve aportar características funcionais para melhorar as condições de rolamento dos veículos quanto a comodidade e segurança.

A maior parte dos pavimentos brasileiros apresenta como revestimento uma mistura de agregados minerais com ligantes asfálticos que devem ser dosados em proporções adequadas de modo a formar uma mistura homogênea (BERNUCCI et al., 2008). Esta pode ser produzidas a quente ou a frio e eventualmente apresentar incorporação de aditivos (MELO, 2014).

Para Ibarra (2003), o concreto asfáltico deve ser capaz de suportar o carregamento e resistir as tensões produzidas com pequenas deformações. Além dessa importante característica, deve apresentar resistência a deformações plásticas, à fadiga e a desagregação, uma adequada resistência a derrapagem, estabilidade, impermeabilidade e durabilidade frente aos agentes externos.

As cargas de tráfego geram tensões no pavimento que são assumidas por simplificação, como uma força vertical uniforme e aplicada em uma área circular, onde a pressão de contato é igual a pressão de inflação dos pneus. A repetição desse estado de tensão solicita à flexão o revestimento asfáltico, com a formação de trincas de tração na parte inferior da camada que, deste ponto, propagam-se até a superfície (MEDINA; MOTTA, 2005).

A camada de revestimento está sujeita ao trincamento com origem na superfície ocasionado por grandes tensões de tração junto aos bordos dos pneus e grande amplitude de variação térmica. Pelo processo de envelhecimento da mistura asfáltica, exposta aos agentes climáticos, a superfície do pavimento torna-se rígida, acarretando também no trincamento com origem superficial (MINHOTO, 2005; SANTOS, 2016).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ASFÁLTICO

A caracterização das propriedades do concreto asfáltico na estrutura do pavimento é bastante complexa, tendo em vista que muitas das condições de contorno a que está submetido são de difícil reprodução em laboratório, como a configuração de tensões do tráfego real, de diferentes magnitudes e aleatoriamente aplicadas; sazonalidade climática; deterioração com o tempo e a temperatura e ainda interação entre cada fator. Fatores intrínsecos ao material, como teor e tipo de ligante, granulometria, forma dos agregados e volume de vazios, por exemplo, também influenciam o desempenho geral da mistura (IBARRA, 2003; SANTOS, 2016).

Demanda-se uma análise das propriedades mecânicas que busque os fatores mais relevantes, possibilitando a previsão do comportamento da mistura asfáltica em campo. Os

resultados obtidos devem ser comparados com critérios de dimensionamento predefinidos, evitando o aparecimento de defeito cabíveis aos revestimentos asfálticos durante a vida em serviço (BERNUCCI et al., 2008).

Os ensaios mecânicos podem ser categorizados conforme a indicação a seguir:

Ensaio convencionais: estabilidade Marshall;

Ensaio de módulo: módulo de resiliência e módulo complexo;

Ensaio de ruptura: resistência à tração indireta; resistência à fadiga;

Ensaio de deformação permanente: simulador de tráfego de laboratório; tração axial estática; compressão de carga repetida;

Ensaio complementares: Cântabro; dano por umidade induzida (BERNUCCI et al., 2008).

Modelos convencionais, baseados em carregamentos estáticos e na Lei de Hooke, utilizam-se para a caracterização dos pavimentos flexíveis. Contudo esses modelos só são representativos da resposta estrutural se as considerações de pequenas deformações são válidas, com aplicação de esforços a baixa temperatura e elevada velocidade de carregamento, enquanto que o comportamento não linear é observado em temperaturas elevadas e velocidades de carregamento baixas (VALE et al., 2006 apud SANTOS, 2016).

Os concretos asfálticos possuem características do ligante, de viscoelasticidade e suscetibilidade térmica, sendo necessário caracterizar seu comportamento a partir da teoria da viscoelasticidade. Hipóteses de linearidade, homogeneidade, isotropia são assumidas para obter as propriedades do material (MELO, 2014; QUINTERO, 2016). Fontes (2009) resume que a linearidade é assumida considerando a proporcionalidade de tensões e baixas amplitudes de deformações; a homogeneidade é considerada no nível macroscópico e a isotropia considera que material tenha propriedades iguais em todas as direções.

Com o exposto, Melo (2014) afirma que para caracterizar o efeito estrutural no pavimento da camada de concreto asfáltico e sua evolução com o tempo, as propriedades mecânicas da mistura devem ser modeladas considerando alguns aspectos, como:

A rigidez e a evolução da rigidez com o tempo;

A fadiga e a lei da evolução do dano;

A deformação permanente e o acúmulo dessas deformações e,

A iniciação de trincas e a propagação dessas, em particular, a baixas temperaturas.

O Instituto de Pesquisas Rodoviárias, em DNIT (2006), aponta que as principais patologias que ocorrem nos pavimentos brasileiros são as trincas por fadiga e os afundamentos

plásticos. Para Domec (2005) e Rudensky. (1997 apud Barra, 2009) é principalmente a fadiga o fenômeno que conduz os pavimentos, sobretudo as camadas asfálticas, ao colapso.

2.3 RIGIDEZ DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Tradicionalmente, para caracterizar mecanicamente uma mistura asfáltica se utilizam os ensaios de rigidez. Com eles pode-se determinar o comportamento elástico (módulo elástico) e o comportamento dinâmico (módulo resiliente e módulo dinâmico). Devido às limitações dos modelos, a relação entre tensão e deformação era representada pelo módulo elástico, mas, dada a natureza viscoelástica do concreto asfáltico, o parâmetro de rigidez apropriado e de maior utilização na concepção estrutural de pavimentos é o módulo complexo (MELO, 2014; RAMOS, 2015).

Diversos fatores externos ao material asfáltico, como temperatura do corpo de prova e tempo de aplicação da carga nos quais são realizados os ensaios podem afetar significativamente os resultados (FONTES, 2009).

Como apresentado por Bernucci et al. (2008), pelo comportamento viscoelástico a maior rigidez se apresenta em carregamentos de menor duração de aplicação do pulso de carga, a menor rigidez em carregamentos com maior duração, apresentando como limite o carregamento estático. Considerando o fator temperatura, a rigidez tende a crescer para baixas temperaturas. Em temperaturas elevadas aumentam os valores de deformabilidade e a rigidez cai.

Em serviço, as variações diárias e sazonais da temperatura causam variações na rigidez do revestimento asfáltico. As situações meteorológicas, assim, condicionam a deformabilidade maior ou menor dos revestimentos asfálticos (MEDINA; MOTTA, 2005; YAVUZTURK; KSAIBATI; KHALED; CHIASSON, 2005).

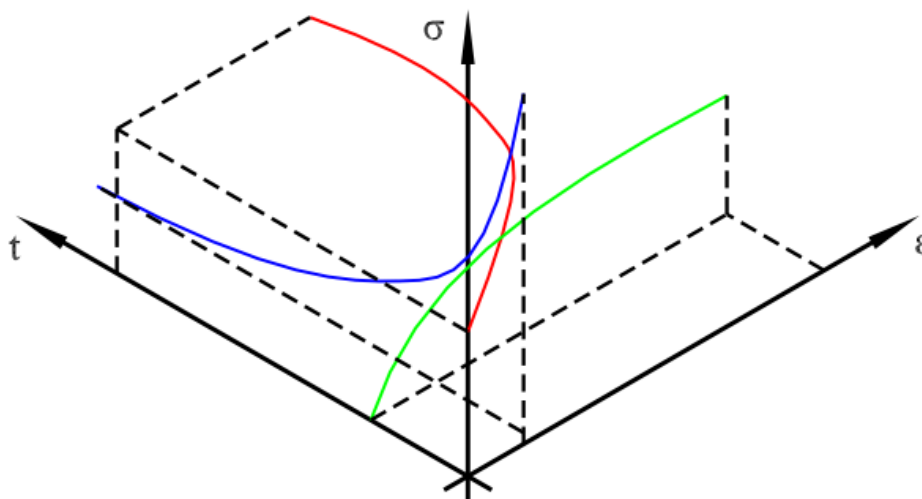
2.4 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para o estudo das misturas asfálticas e seu comportamento reológico, existem dois modos de caracterização experimental das propriedades termo-viscoelásticas: temporal e frequencial (BARRA, 2009).

2.4.1 Domínio Temporal

Diferente da modelação simplificada de outros materiais utilizados na engenharia, o comportamento viscoelástico não pode ser representado em um diagrama simples de tensão-deformação, uma vez que o tempo é um parâmetro da função. Tem-se então um diagrama tridimensional como representado na Figura 1. Neste diagrama se obtém curvas representativas considerando valores constantes para cada variável (CARRIÓN CABRERA; OCHOA TOCACHI, 2011).

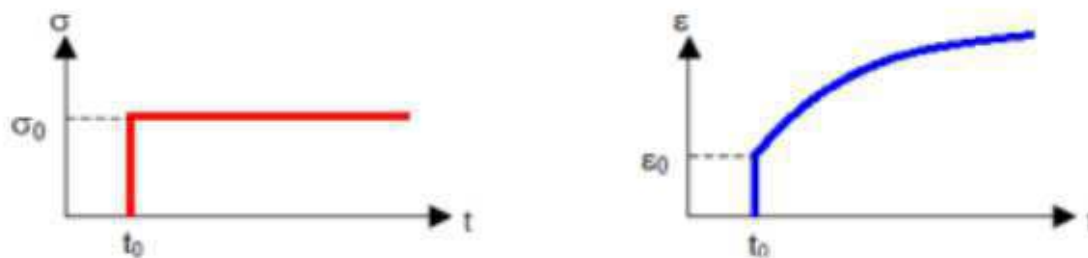
Figura 1: Função tridimensional da viscoelasticidade



Fonte: Adaptado de Carrión cabrera & Ochoa Tocachi (2011)

O fenômeno da fluência ocorre na aplicação de um carregamento constante no tempo, produzindo um escoamento viscoso do material como mostra a Figura 2 (QUINTERO, 2011).

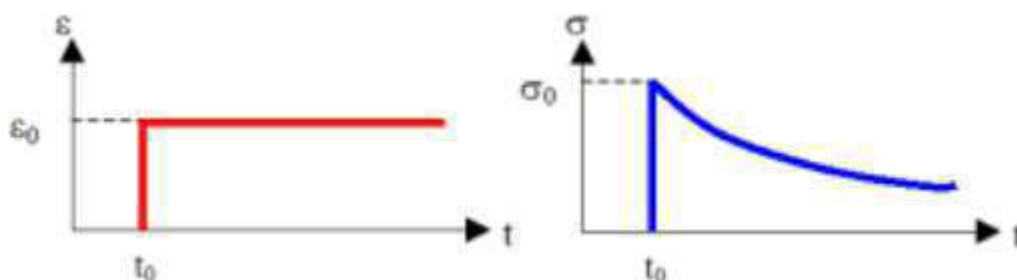
Figura 2: Fluência a tensão constante



Fonte: Adaptado de (Olard (2003) apud Quintero (2011))

Se mantida constante a variável de deformação do material em relação ao tempo ocorre uma diminuição progressiva da tensão em função do tempo, a relaxação (QUINTERO, 2011). A Figura 3 ilustra esse fenômeno.

Figura 3: Relaxação a deformação constante



Fonte: Adaptado de Olard (2003) apud Quintero (2011)

2.4.2 Domínio Freqüencial e o Módulo Complexo

No domínio freqüencial o material é solicitado com frequência de carregamento e temperatura variados. As medidas são feitas para pequenas deformações, assim o comportamento principal das misturas asfálticas é de um material viscoelástico linear (MANDEL, 1955; BAAJ, 2002 apud BARRA, 2009).

O módulo complexo (E^*) vem sendo utilizado como uma alternativa ao módulo de resiliência na caracterização de misturas asfálticas uma vez que considera a viscoelasticidade das misturas asfálticas, bem como contabiliza os efeitos de temperatura de diferentes frequências de carregamento e de temperatura (BERNUCCI et al., 2008).

O módulo complexo é definido como a razão entre a amplitude complexa de uma tensão sinusoidal (Equação 1) aplicada a um material e a amplitude complexa da deformação

(Equação 2). Considerando o caráter viscoelástico do material, a deformação possui um atraso em relação à tensão, que é representado pelo ângulo de fase (FONTES, 2009). A Figura 4 ilustra a representação gráfica das grandezas envolvidas.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \times \sin(\omega t + \delta) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \times \sin(\omega t) \quad (2)$$

Onde:

$\sigma(t)$ é a tensão no instante t ;

σ_0 é a amplitude de tensão;

ω é a velocidade angular aplicada;

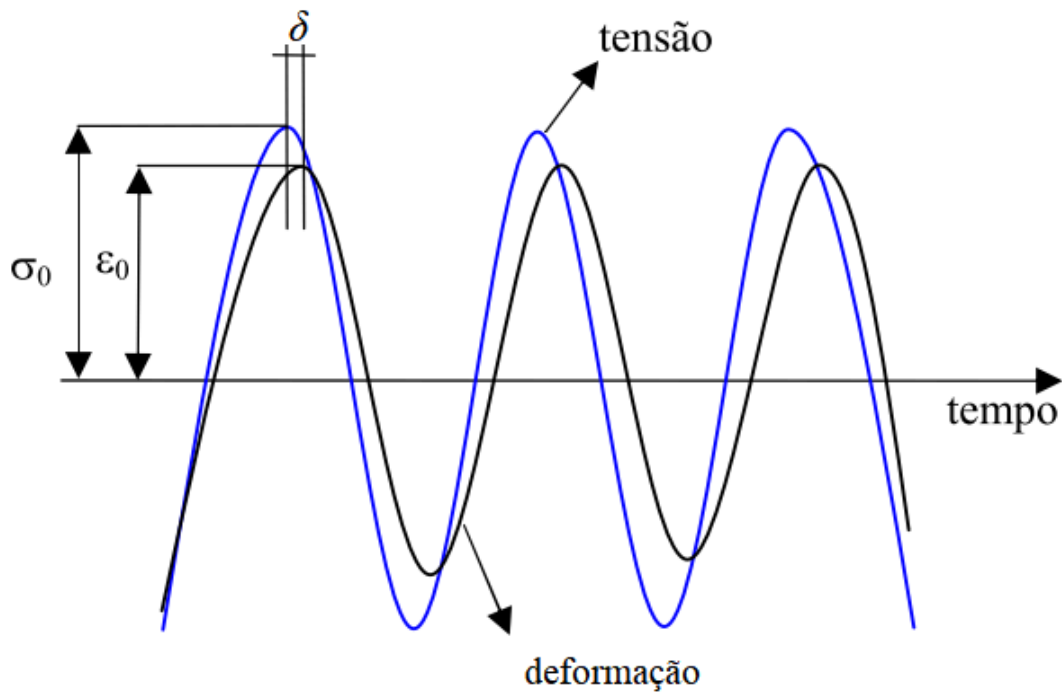
t é o tempo;

δ é o ângulo de fase;

$\varepsilon(t)$ é a deformação no instante t ; e

ε_0 é a amplitude de deformação.

Figura 4: Representação das curvas de tensão e deformação com o ângulo de fase



Fonte: Adaptado de Fontes (2009)

O ângulo de fase é utilizado como um indicador da preponderância viscosa ou elástica do material, uma vez que materiais puramente elásticos apresentam $\delta = 0^\circ$. Para materiais puramente viscosos, $\delta = 90^\circ$ (BERNUCCI et al., 2008).

O módulo dinâmico $|E^*|$ (Equação 3), é o valor absoluto do módulo complexo, dado pela relação entre as amplitudes de tensão e deformação (FERRY, 1980 apud BERNUCCI et al., 2008).

$$|E^*| = \sigma_0 / \varepsilon_0 \quad (3)$$

Onde:

$|E^*|$ é o módulo dinâmico;

σ_0 é a amplitude de tensão; e

ε_0 é a amplitude de deformação.

O módulo de elasticidade dinâmico ou módulo de armazenamento (E_1), é a componente real e representa a energia armazenada no material e que pode ser recuperada (Equação 4). A parte imaginária do módulo complexo é chamada de módulo de perda (E_2) e representa a dissipação de energia por atrito interno do material (Equação 5).

$$E_1 = \frac{\sigma_0 \times \cos \delta}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0 \times \sin \delta}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

Onde:

E_1 é a componente real do módulo complexo;

E_2 é a componente imaginária do módulo complexo;

σ_0 é a amplitude de tensão;

δ é o ângulo de fase; e

ε_0 é a amplitude de deformação.

O módulo dinâmico e o ângulo de fase podem ser calculados em função dos módulos de armazenagem e de perda pelas equações 6 e 7.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (6)$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{E_2}{E_1} \quad (7)$$

Onde:

$|E^*|$ é o módulo dinâmico;

E_1 é a componente real do módulo complexo;

E_2 é a componente imaginária do módulo complexo; e

δ é o ângulo de fase.

O cálculo do módulo complexo implica na determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase para diferentes valores de temperatura e frequência. Através destes dados são obtidos os seguintes gráficos: curvas isotérmicas; espaço ou diagrama de Black; curvas isócronas; plano Cole-Cole; curva de equivalência frequência-temperatura (PARTL & FRANCKEN, 1998 apud FONTES, 2009).

2.5 MODELOS VISCOELÁSTICOS

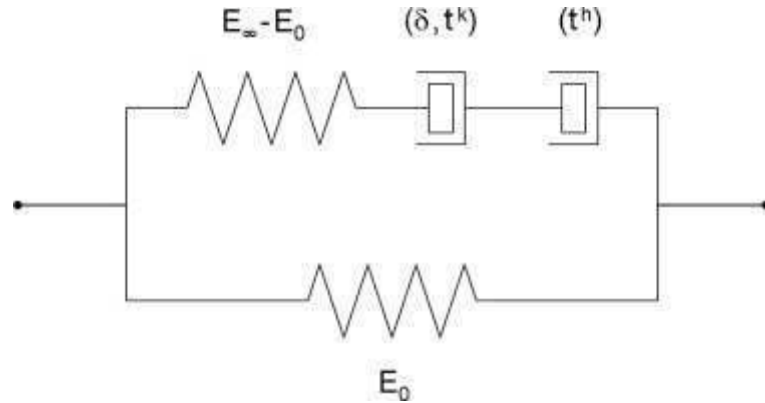
Para descrever e representar fisicamente o comportamento mecânico viscoso e elástico que se apresentam em materiais viscoelásticos, a bibliografia de referência indica, em geral, arranjos geométricos de molas e amortecedores, que respectivamente simulam a resposta elástica e viscosa do material (MELO, 2014). Dentre os principais modelos destaca-se: modelo de Maxwell; modelo de Kevin-Voigt; modelo generalizado de Maxwell; modelo generalizado de Kevin-Voigt; modelo analógico de Huet e Huet-Sayegh.

Como visto em Quintero (2016), o modelo de Huet-Sayegh é atualmente utilizado em softwares de dimensionamento de pavimento que levam em consideração a viscoelasticidade.

2.5.1 Modelo de Huet-Sayegh (1965)

O modelo de Huet-Sayegh é formado por dois ramos paralelos dos quais um possui uma mola e dois amortecedores parabólicos, e o outro apenas uma mola, como indica a Figura 5.

Figura 5: Representação analógica do modelo Huet-Sayegh



Fonte: Adaptado de Quintero (2011)

A mola em paralelo apresenta pouca rigidez (E_0) e representa o módulo elástico para quando o material é solicitado nas baixas frequências e elevada temperatura; E_∞ , representa o módulo elástico do material para solicitações de elevada frequência e baixa temperatura; ($E_\infty - E_0$), representa a resposta elástica instantânea retardada (QUINTERO, 2011).

Barra (2009) explica que os amortecedores introduzem no modelo as funções de fluência parabólicas (t^h e t^k) e um parâmetro associado ao tempo de relaxação dos amortecedores (τ) que se assemelha ao retardo entre a tensão aplicada e a deformação resultante em função do tempo, variando de acordo com a temperatura (θ).

O módulo complexo obtido com os parâmetros do modelo descrito é expresso na Equação 8.

$$|E^*| = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (8)$$

Onde:

$|E^*|$ é o módulo dinâmico;

E_0 é o módulo elástico para baixa frequência e elevada temperatura;

E_∞ é o módulo elástico para elevada frequência e baixa temperatura

ω é a frequência angular da solicitação;

τ é o tempo de relaxação;

δ é o ângulo de fase;

i é o número complexo definido por $i^2 = -1$; e

k e h funções parabólicas de fluência.

2.6 FADIGA DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS

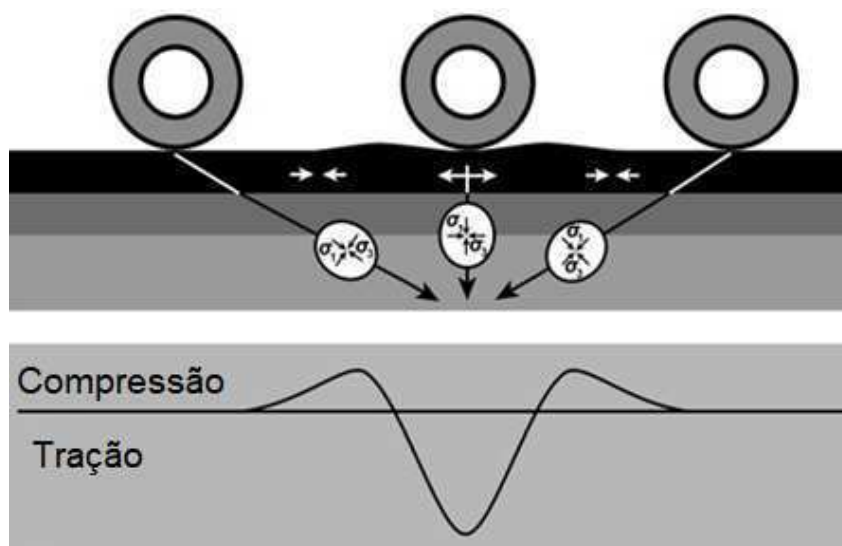
Como elucidado por Motta (1979), o comportamento dos pavimentos flexíveis está correlacionado as deflexões transientes ocasionadas por carregamentos de curta duração gerados pela passagem dos veículos.

O dano por fadiga é o principal fenômeno de deterioração do pavimento e sua compreensão possibilita o correto dimensionamento da estrutura (FONTES, 2009; QUINTERO, 2016).

A degradação por fadiga é representada pela ruptura do material após uma sequência repetida de solicitações, em geral com um grande número de ciclos, denominado N. A amplitude de solicitação é sempre inferior ao esforço necessário para a ruptura instantânea do material (OTTO, 2009).

Para Melo (2014) o revestimento asfáltico em campo está submetido à ação repetida de esforços de tração e compressão por flexão como mostra a Figura 6. O trincamento por fadiga se origina nas fibras inferiores quando se encontram tracionadas. O concreto asfáltico deve então ser capaz de resistir a essas solicitações.

Figura 6: Esquema de solicitações no concreto asfáltico com a passagem de um eixo



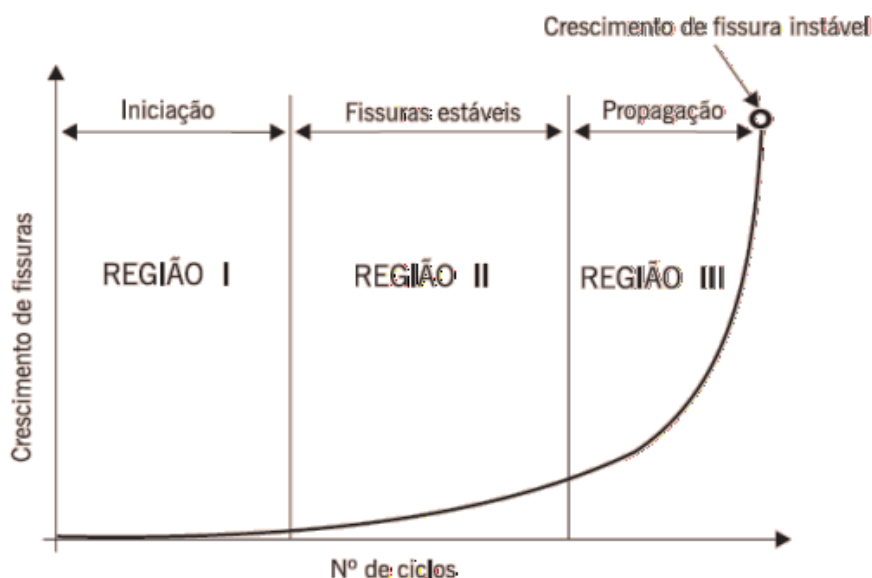
Fonte: Adaptado de Roadex Network (2018)

Segundo Branco et. al (2001 apud Santos, 2016), a passagem de eixos do tráfego provoca alterações nas propriedades dos materiais. Novos carregamentos, mesmo que de igual intensidade, irão agir em um material de propriedades diferentes, e assim sucessivamente. A

repetição das solicitações altera a resistência dos materiais e, conjuntamente ao clima, desencadeiam o processo de fadiga.

Bernucci et al. (2008) diferencia e divide os estágios de crescimento de fissura em uma estrutura sujeita ao carregamento cíclico, conforme a Figura 7. Na região I aparecem as primeiras mudanças microestruturais com a formação de microfissuras, representando o início da zona de danos irreversíveis; A região II caracteriza-se pela junção das microfissuras formadas anteriormente, gerando microfissuras; O rápido crescimento das microfissuras levando o pavimento ao colapso, está representado na região III.

Figura 7: Estágios do processo de fadiga



Fonte: Bernucci et al. (2008)

2.6.1 Ensaios de fadiga

Os ensaios de fadiga consistem na submissão de corpo de prova do material a solicitações repetidas, contando a quantidade de ciclos que levam a ruptura. Podem ser realizados a tensões controladas, com aumento da deformação observada e término na ruptura do corpo de prova, ou a deformações controladas, com decréscimo da tensão do carregamento e término do ensaio definido em 50% do módulo de rigidez inicial (FONTES, 2009; QUINTERO, 2016).

Para a avaliação de desempenho a fadiga de concretos asfálticos foram desenvolvidos diferentes tipos de ensaios que simulam diferentes condições de carga. Entre os ensaios

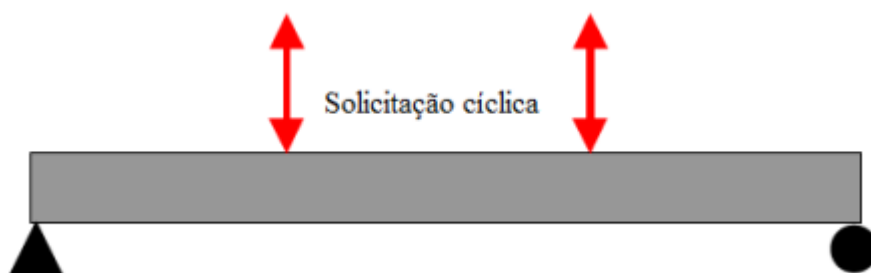
utilizados encontra-se: flexão alternada a dois pontos, a três pontos e a quatro pontos, ensaios de carregamento uniaxial e ensaios por compressão diametral (FONTES, 2009).

O ensaio de flexão alternada em viga de quatro pontos utilizado na pesquisa é descrito com detalhes abaixo.

2.6.1.1 Ensaio de flexão em viga quatro pontos

O teste é realizado em uma viga bi-apoiada com a aplicação de duas cargas em pontos simétricos, dividindo o vão em três partes de igual geometria como mostra a Figura 8. A seção intermediária é uma zona em que atua apenas um momento fletor de valor uniforme, aproximando o comportamento mecânico do ensaio ao de campo (BAAJ, 2002; FONTES, 2009).

Figura 8: Seções da amostra no ensaio em 4 pontos



Fonte: Adaptado de Baaj (2002)

O terço médio é o mais susceptível a microfissuração por apresentar maiores deslocamentos (MELO, 2014).

2.6.2 Método de análise do comportamento a fadiga

Abordagens mecanicistas ou fenomenológicas são utilizadas para a análise de concretos asfálticos na fadiga. As análises fenomenológicas relacionam a tensão ou a deformação aplicada no ensaio ao número de ciclos (N_f) até a falha. Abordagens mecanicistas se utilizam de princípios de mecânica das fraturas, de conservação de energia ou outros princípios físicos para analisar a falha por fadiga (MELO, 2014). Se dará ênfase na abordagem fenomenológica a qual é utilizada neste trabalho.

2.6.2.1 Abordagem fenomenológica

Considerado o modelo geral de fadiga, nesse tipo de abordagem são relacionados o número de ciclos que levou a amostra à ruptura com o nível de tensão (Equação 9) ou deformação (Equação 10) imposto inicialmente (BERNUCCI et al., 2008; MAGGIORE, 2013).

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{n_1} \quad (9)$$

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{n_3} \quad (10)$$

Onde:

N é o número de repetições necessárias para levar à ruptura da amostra;

σ_t é a tensão de tração, para ensaios com tensões controlada;

$\varepsilon(t)$ é a deformação de tração, para ensaios com deformações controladas; e

k_1 , k_3 , n_1 e n_3 são constantes obtidas de regressão linear dos pares $N \times \sigma_t$ obtidos nos ensaios.

Essencialmente empírica, a abordagem fenomenológica impede sua aplicação em modelos de carregamento complexo observados em campo além de não fornecer uma relação entre a carga e forma de acumulação dos danos na mistura asfáltica. Por seus mecanismos complexos, a fadiga é melhor analisada em abordagens mecanicistas (CARPENTER et al, apud MELO, 2014).

2.6.3 Critérios de ruptura

Os critérios de ruptura utilizados para os ensaios de mistura asfáltica podem ser baseados na dissipação de energia ou na degradação da rigidez. Os que se baseiam na energia dissipada são: critério de Carpenter; critério de Pronk; critério de Pronk e Hopman e critério de Rowe. Já os fundamentados na degradação da rigidez dividem-se em: critério convencional; critério de Rowe e Bouldin; critério da ASU e critério de Franken (ANDERSON et al., 2001; MAGGIORE, 2013; MELO, 2014).

Será dada ênfase no critério convencional de ruptura, utilizado na abordagem fenomenológica para o ensaio de fadiga.

2.6.3.1 Critério convencional de ruptura

Conceitualmente pode-se executar os ensaios à fadiga em laboratório mantendo-se constante a tensão ou a deformação. A rigidez dos corpos de prova diminui na medida em que se acumulam as solicitações, apresentando aumento no deslocamento ou diminuição da força quando é mantida constante, respectivamente, a tensão ou a deformação durante o experimento (ALMEIDA, 2017; OTTO, 2009).

Para ensaios realizados a tensões controladas a ruptura é arbitrariamente definida: Pell & Cooper (1975) e Tayebali et al. (1992 apud Ghazi & Aroon; 2004) definem a falha por fadiga no final do ensaio, com a fratura do corpo de prova; o critério de ruptura para Rowe apud Ghazi & Aroon (2004) ocorre com a redução de 90% do módulo complexo inicial do corpo de prova; Van Dijk apud Ghazi & Aroon (2004) apresenta o critério ocorrendo quando a deformação é igual ao dobro da deformação inicial.

Para ensaios conduzidos a deformações controladas, a definição do critério da ruptura não é visualmente obtida (FONTES, 2009; OTTO, 2009). O critério convencional determina que a falha do material, e portanto, o final do ensaio, deve ser considerada quando a amostra atinge 50% da rigidez inicial. Este critério de degradação de rigidez é amplamente utilizado por pesquisadores (PRONK & HOPMAN, 1990; TAYEBALI et al., 1993; VAN DIJK & VESSER, 1977; MCCARTHY, 1960 apud GHAZI; AROON, 2004). A normativa AASHTO T 321-07 discorre sobre os procedimentos para a determinação da vida de fadiga de CBUQ submetido a flexão cíclica, e adota este critério para o critério de ruptura do ensaio.

2.7 A TEMPERATURA DOS PAVIMENTOS

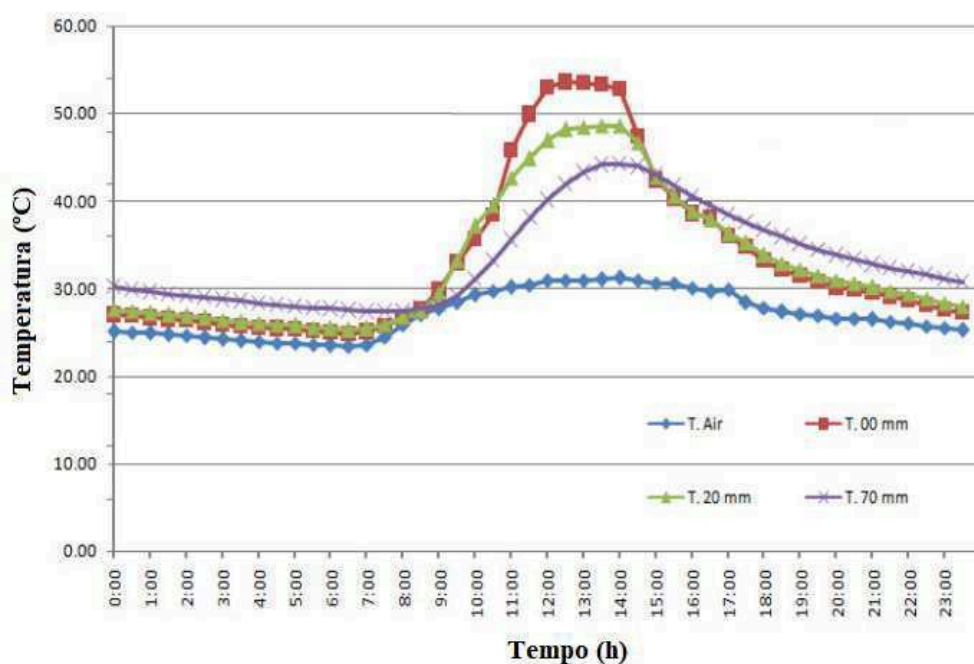
A performance estrutural, bem como a funcional, dos pavimentos asfálticos pode ser fortemente afetada pela temperatura do revestimento. Se em baixas temperaturas o concreto asfáltico pode apresentar fissuras de contração, em condições de elevada temperatura a deformação permanente deve ser considerada como uma possível manifestação patológica (LI; LIU; SUN, 2018).

Para Medina e Motta (2005), as variações diárias e sazonais da temperatura causam variações na rigidez e consequentemente na deformabilidade do material. Almeida (2017) destaca o surgimento de tensões e deformações na estrutura do pavimento devido aos efeitos de expansão e retração térmica. Com o exposto, é vital conhecer as variações de temperaturas as

quais o revestimento asfáltico será submetido na vida útil, desenvolvendo procedimentos para a predição da amplitude térmica encontrada.

A Figura 9 demonstra a variação com o tempo do perfil de temperaturas do concreto asfáltico em um dia ensolarado. Nota-se que os pontos máximos das curvas se deslocam no sentido do tempo crescente quando as profundidades aumentam (MEDINA; MOTTA, 2005).

Figura 9: Variação horária da temperatura do ar e do revestimento asfáltico em diferentes profundidades



Fonte: Adaptado de Ariawan;Subagio; Setiadji, (2015)

Metodologias para a predição da temperatura da mistura asfáltica em serviço foram propostas por diversos pesquisadores. Essas metodologias se dividem em duas categorias: Métodos analíticos, que aplicam teorias de transferência de calor combinadas com as propriedades térmicas do asfalto; e métodos estatísticos, que utilizam modelos de regressão para obter curvas que relacionam aferições de temperaturas do revestimento e dados climáticos (CHAO; JINXI, 2018).

Em 1957, Barber utilizou métodos analíticos para apresentar um modelo matemático (Equação 14) que calcula a temperatura máxima do pavimento em diferentes profundidades a partir de dados meteorológicos e da teoria da difusão térmica, uma vez que o pavimento se mostra dependente dos fatores climáticos (LI et al., 2017; MEDINA; MOTTA, 2005).

$$T = T_m + T_v \left\{ H e^{-x/C} / [(H + C)^2 + C^2]^{1/2} \right\} \times \sin[0,262t - xC - \tan^{-1} C(H + C)^{-1}] \quad (14)$$

Onde:

T é a temperatura do pavimento asfáltico na profundidade x;

T_m é a temperatura média do ar junto a superfície;

T_v é a amplitude máxima de temperatura do ar em relação à média, T_m;

t é o tempo a partir do início de um ciclo, em horas;

x é a profundidade, medida em metros;

h é o coeficiente de transmissão térmica, em J/h.m⁻².°C;

k é a condutividade térmica, em J/h.m.°C;

H=h/k, em L⁻¹;

c é a capacidade calorífica específica, em J/kg.°C;

w é a massa específica, em kg/m³;

$a = k \times c^{-1} \times w^{-1}$; e

$$C = \sqrt{\frac{0,131}{a}}.$$

Comparando os valores calculados e medidos apresentados em Barber (1957) evidencia-se a boa correlação, principalmente nos dias ensolarados e quando não ocorrem variações bruscas das condições atmosféricas. Mudanças rápidas tais como chuvas, passagem de nuvens; quedas de temperatura do ar, não são englobadas pela fórmula. Desta forma, fenômenos de precipitação, como a chuva por exemplo, não são contemplados pela equação.

Este e outros modelos matemáticos analíticos calculam com razoável precisão o gradiente de temperaturas dos pavimentos mas requerem um elevado número de dados, que os torna complexos e de difícil uso (LI et al., 2017).

Com o surgimento *Strategic Highway Research Program* (SHRP) em 1990, vieram estudos para determinar as temperaturas críticas mínimas e máximas dos pavimentos com precisão suficiente para ser aplicada em diversas regiões. O algoritmo Superpave utiliza métodos estatísticos e probabilísticos baseados em dados climáticos e dos pavimentos, coletados através do *Long-Term Pavement Performance Program* (LTPP). A Equação 15 fornece o modelo.

$$T_{pave} = [T_{air} - 0,00618(latitude)^2 + 0,22891(latitude) + 42,2]0,9594 - 17,78 \quad (15)$$

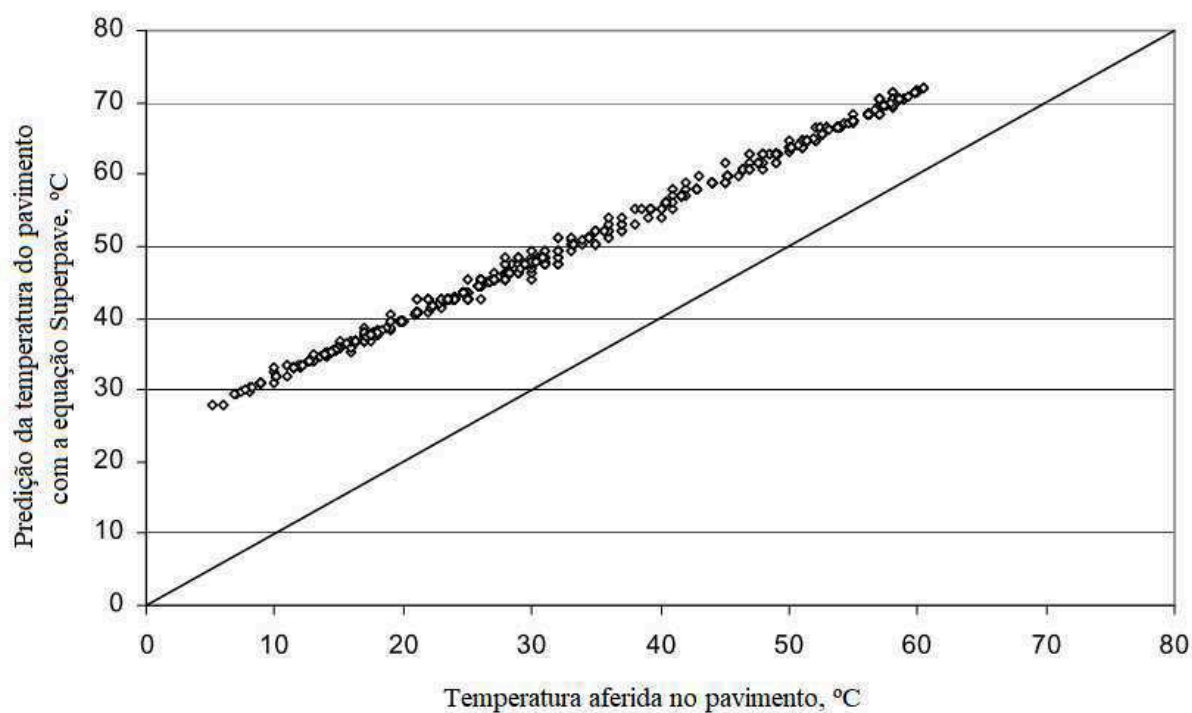
Onde:

T_{pave} é a temperatura do pavimento 2cm abaixo da superfície; e

T_{air} é a temperatura do ar.

Em Albayati & Mahir (2017), foram comparadas as medições instrumentadas da temperatura do pavimento, 2 cm abaixo da superfície, com a temperatura obtida pela equação do modelo Superpave. Chegando em superestimação de até 20 °C quando a temperatura medida é inferior a 30 °C. A Figura 10 ilustra a aderência do modelo Superpave à medição.

Figura 10: Comparação entre a predição da temperatura do pavimento com a equação do Superpave e medição instrumentada a 2 cm de profundidade



Fonte: Adaptado de Albayati & Mahir (2017)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia para a realização do trabalho, conforme as etapas a seguir.

ETAPA 1 – Definição e caracterização da estrutura do pavimento: Essa etapa buscou definir e caracterizar a estrutura do pavimento a ser avaliada neste trabalho. Será utilizada a estrutura do pavimento existente na cidade de Araranguá, referente a um segmento monitorado na BR-101/SC, entre os quilômetros 411,5 e 412,5. A mistura asfáltica do revestimento do pavimento foi estudada Melo (2014) e ensaiada a fadiga na temperatura de 4 °C por Pereira (2017) e nas temperaturas de 15 °C e 20 °C por Melo (2014). Nesta etapa são apresentadas também a caracterização dos materiais constituintes da estrutura.

ETAPA 2 – Coleta de dados meteorológicos: Para o desenvolvimento da simulação numérica proposta neste trabalho fez-se necessária a coleta de dados meteorológicos. Foram obtidas através da estação automática instalada em Araranguá, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) informações de temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento para a hora do dia e datas a serem avaliadas neste estudo. As informações meteorológicas disponibilizadas compreendem o período de 22/09/17 até 21/09/2018. Estes dados foram utilizados para calcular o gradiente de temperaturas no revestimento asfáltico através do modelo matemático de Barber.

ETAPA 3 – Simulações numéricas e definição do gradiente de temperaturas no revestimento asfáltico: Foram executadas 8 simulações numéricas, considerando as estações do ano (Primavera, Verão, Outono e Inverno). Quatro simulações numéricas levaram em conta o gradiente de temperaturas no revestimento asfáltico e as outras quatro simulações consideraram a temperatura média em toda espessura do revestimento. Para as simulações com gradiente, discretizou-se a camada de revestimento asfáltico analisada em camadas de espessura igual a 2 cm, atribuindo a cada uma destas a temperatura calculada pela equação de Barber, obtendo-se assim um gradiente de temperaturas em função da profundidade em que se encontra a camada sincretizada.

ETAPA 4 – Obtenção da microdeformação de tração (ϵ_t): Nesta fase determinou-se através do software de simulação numérica *ViscoRoute 2.0* a microdeformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico para as 8 simulações numéricas realizadas.

ETAPA 5 – Obtenção da vida à fadiga segundo a abordagem fenomenológica (N_f): A partir das microdeformações obtidas nas simulações numéricas, calculou-se o número de ciclos (N_f) até a ruptura do revestimento asfáltico. Para o cálculo foram utilizadas as curvas de fadiga obtidas por Melo (2014) e Pereira (2017). Deste modo, foi avaliada a influência do gradiente de temperaturas na estimativa de ruptura à fadiga do revestimento asfáltico, assim como a influência da estação do ano.

A seguir são detalhadas cada etapa do método proposto.

3.1 DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO

Na primeira fase do trabalho foi selecionada uma estrutura de pavimento asfáltico existente, que dispusesse de dados relacionados a constituição das camadas, e principalmente, o comportamento reológico e a resistência a fadiga da mistura asfáltica.

Adotou-se a estrutura de um dos segmentos monitorados na BR-101/SC pela Rede Temática do Asfalto/Petrobras, localizado no contorno de Araranguá/SC. A estrutura é constituída de 18 cm de revestimento asfáltico, 18 de base (brita graduada), 20 de sub-base (macadame seco) e subleito em páleo duna. A mistura asfáltica utilizada como camada de revestimento deste trecho experimental foi desenvolvida e ensaiada na tese de doutorado de Melo (2014) e ensaios complementares foram realizados na pesquisa de Pereira (2017).

3.1.1 Caracterização dos materiais empregados na mistura asfáltica

A mistura asfáltica implantada no segmento é constituída de agregados minerais e ligante asfáltico CAP 50-70.

3.1.1.1 Agregados Minerais

Melo (2014) caracterizou os agregados utilizados (brita ¾”, pedrisco e pó de pedra) através das seguintes normativas:

- a) **ASTM D 5821** – *Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate* para a determinação da angularidade do agregado graúdo;
- b) **ASTM C 1252** – *Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate* para a determinação da angularidade do agregado miúdo;
- c) **ABNT NBR 6954** – *Lastro-padrão: Determinação da Forma do Material* para as partículas planas e alongadas;
- d) **AASHTO T 176** – *Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test* para o teor de argila;
- e) **ASTM C 131** – *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine* para a caracterização quanto à dureza;
- f) **ASTM C 88** – *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate* para a classificação quanto à sanidade;
- g) **AASHTO T 112** – *Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates* para os materiais deletérios;
- h) **ASTM C 127** – *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate* para a determinação de massa específica real, aparente e absorção do agregado graúdo;
- i) **DNER-ME 084** – *Agregado Miúdo: Determinação da Densidade Real* para a massa específica real do agregado miúdo e,
- j) **DNER-ME 085** – *Material Finamente Pulverizado: Determinação da Massa Específica Real* para a massa específica real do material pulverulento.

A metodologia Superpave foi empregada para a composição dos agregados, com tamanhos nominais máximos de 19 mm. Além dos agregados minerais foi empregada a cal hidratada como filler para a mistura asfáltica.

3.1.1.2 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico foi caracterizado por Melo (2014). As seguintes normas foram utilizadas para determinar algumas das características do material:

- a) **ASTM D 4402** – *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer* para a determinação da viscosidade aparente;
- b) **ASTM D 5** – *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Material* para os ensaios de penetração;
- c) **ASTM D 36** – *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen: Ring-an-ball Apparatus* para a determinação do ponto de amolecimento.

3.1.2 Dosagem da mistura asfáltica

Para a dosagem, (MELO, 2014), seguiu as recomendações das normas AASHTO M 323 – *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design* e ASSHTO R 35 – *Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt*. A mistura asfáltica foi formulada para tráfego pesado, conforme a metodologia Superpave, utilizando o compactador giratório (Superpave Gyratory Compactor).

3.1.3 Avaliação da resistência à fadiga e do comportamento reológico da mistura asfáltica

Para avaliar a mistura asfáltica segundo o módulo complexo, Melo (2014) se utiliza do equipamento australiano *Pneumatic 4 Point Bending Apparatus*, ilustrado na Figura 11, aplicando diferentes frequências de carregamentos e temperaturas nos corpos de prova prismáticos. O mesmo equipamento foi utilizado para os teste de resistência à fadiga realizados por Melo (2014) nas temperaturas de 15 °C e 20 °C e Pereira (2017) na temperatura de 4 °C.

Figura 11: Aparato de teste a quatro pontos



O ensaio de módulo complexo foi realizado com carregamento sinusoidal alternado e deformações controladas, sendo a amplitude máxima de deformação igual a $50 \mu\text{m/m}$ (ensaio não destrutivo). Com a execução do ensaio em diversas temperaturas e frequências é possível avaliar o comportamento reológico da mistura, e partir destes dados obter os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh.

Para a mensuração da resistência a fadiga Melo (2014) conduziu os ensaios destrutivos em seis corpos de prova para cada temperatura (15°C e 20°C). Pereira (2017) executou o mesmo ensaio com nove corpos de prova a temperatura de 4°C . Ambos autores seguiram as diretrizes da norma europeia EN 12697-24 - *Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 24: Resistance to Fatigue*. Os parâmetros frequência, amplitude de deformação e temperatura são constantes nos ensaios, sendo aplicadas as condições de:

- a) Frequência de carregamento de 10 Hz;
- b) Deformação controlada;
- c) Carregamento sinusoidal;
- d) Critério de ruptura definido como a redução de 50% do módulo de rigidez inicial, valor esse adotado no centésimo ciclo.

3.1.4 Parâmetros dos materiais constituintes da estrutura do pavimento

Para alcançar os objetivos da pesquisa é necessária a determinação dos parâmetros relacionados às propriedades mecânicas dos materiais que formam cada uma das camadas da estrutura do pavimento.

A camada final de terraplenagem e as camadas de base e sub-base são consideradas elásticas na modelagem do pavimento. Melo (2014) utiliza a retroanálise de bacias

deflectométricas, obtidas com *Falling Weight Deflectometer* (FWD) no ano de abertura ao tráfego do segmento, para estimar os parâmetros: módulo de elasticidade (E) e coeficiente de poisson (ν).

A camada de revestimento asfáltico é simulada com comportamento viscoelástico. Os parâmetros reológicos, utilizando o modelo de Huet-Sayegh, foram determinados para a camada segundo as Equações de 16 a 20.

$$E1 = E_0 + \frac{D1}{D1^2 + D2^2} \quad (16)$$

$$E2 = \frac{D2}{D1^2 + D2^2} \quad (17)$$

$$D1 = \frac{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} \cos\left(k\frac{\pi}{2}\right) + (i\omega\tau(\theta))^{-h} \cos\left(h\frac{\pi}{2}\right)}{E_\infty - E_0} \quad (18)$$

$$D2 = \frac{\delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} \sin\left(k\frac{\pi}{2}\right) + (i\omega\tau(\theta))^{-h} \sin\left(h\frac{\pi}{2}\right)}{E_\infty - E_0} \quad (19)$$

$$\tau(\theta) = e^{(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)} \quad (20)$$

Onde:

$E1$ = componente real;

$E2$ = componente imaginária;

E_∞ = módulo complexo infinito. Quando $\omega\tau \rightarrow \infty$, para as elevadas frequências e baixas temperaturas;

E_0 = módulo estático;

i = número complexo;

τ = tempo de relaxação dos amortecedores;

θ = temperatura;

ω = frequência angular de sollicitação;

k, h = parâmetros dos elementos parabólicos, os quais situam-se entre $0 < k < h < 1$;

δ = constante adimensional; e

A_0, A_1, A_2 = parâmetros escalares.

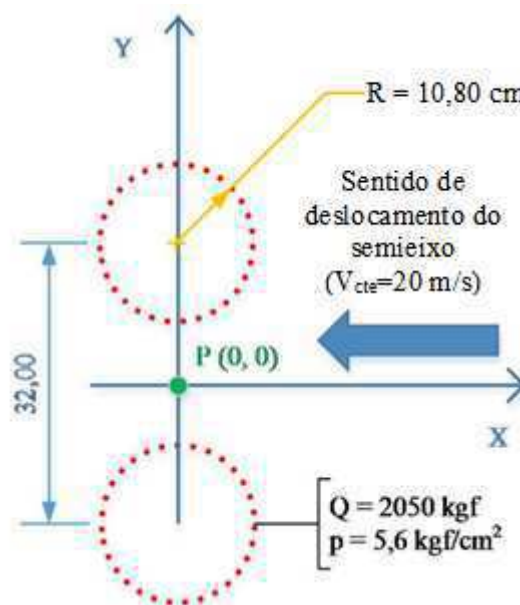
3.1.5 Configuração do carregamento

Para a simulação numérica, adota-se como carregamento o eixo simples de roda dupla de 8,2 toneladas com velocidade constante de 20 m/s. Esta velocidade é equivalente a

frequência de 10 Hz utilizada no carregamento dos ensaios de fadiga executados por Melo (2014) e por Pereira (2017).

A Figura 12, adaptado de Melo (2014), demonstra visualmente a configuração do carregamento utilizada na modelização. A carga por roda (Q) tem valor de 2050 kgf e a distância entre as rodas é de 32 cm. O raio (R) indica a área de contato entre pneu e pavimento, de aproximadamente 366 cm². A pressão (p) representa a razão entre a carga e a área de contato, com valor de 5,6 kgf/cm². O ponto P (0,0) é o referencial pela qual a microdeformação na fibra inferior da camada de revestimento é apresentada no plano cartesiano pelo software.

Figura 12: Configuração de carregamento (semieixo de roda dupla)



Fonte: Adaptado de Melo (2014)

3.2 COLETA DE DADOS METEOROLÓGICOS

Para atender aos objetivos propostos à pesquisa faz-se necessário o conhecimento do gradiente de temperaturas da camada de revestimento asfáltico. Para a estimativa destas temperaturas em diferentes profundidades aplicou-se o modelo matemático de Barber (Equação 14), detalhado na revisão de bibliografia. O modelo baseia-se nas teorias de transferência de calor e apresenta parâmetros de entrada intrínsecos ao material asfáltico e à localização geográfica da implantação do pavimento.

Através do Sistema de Informações Hidro-Meteorológica (SIM) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foi possível extrair informações precisas, em intervalos de 1 hora,

da estação meteorológica automática localizada em Araranguá (28°57'S e 49°29'W, instalada à altura de 12 m), sob o código A867 na rede do SIM. O período de análise dos dados meteorológicos inicia em 22/09/2017 e termina em 21/09/2018, totalizando 365 dias. Os dados de temperatura média do ar, radiação solar, e velocidade do vento foram extraídos, assim, da base de dados do INMET para a obtenção dos fatores climáticos do modelo de Barber.

Para os parâmetros relacionados a termodinâmica, por falta de dados específicos, foram adotadas as constantes apontadas por Barber (1957), Medina e Motta (2005) e Motta (1979). Esses valores são dependentes do material utilizado no revestimento do pavimento e sua utilização implica, portanto, em uma aproximação.

A massa específica do material definida em Melo (2014) será utilizada como parâmetro da mistura.

3.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E DEFINIÇÃO DO GRADIENTE DE TEMPERATURAS NO REVESTIMENTO ASFÁLTICO

Para abranger a variabilidade climática sazonal nas simulações numéricas, o período de análise dos dados meteorológicos inicia em 22/09/2017 e termina em 21/09/2018, totalizando 365 dias. Foi selecionado para cada estação do ano, Primavera; Verão; Outono e Inverno, um único dia representativo. Esses dias foram escolhidos por situarem-se no meio de cada uma das estações climáticas, sendo:

- 05/11/2017 para a Primavera;
- 03/02/2018 para o Verão;
- 05/05/2018 para o Outono; e,
- 06/08/2018 para o Inverno.

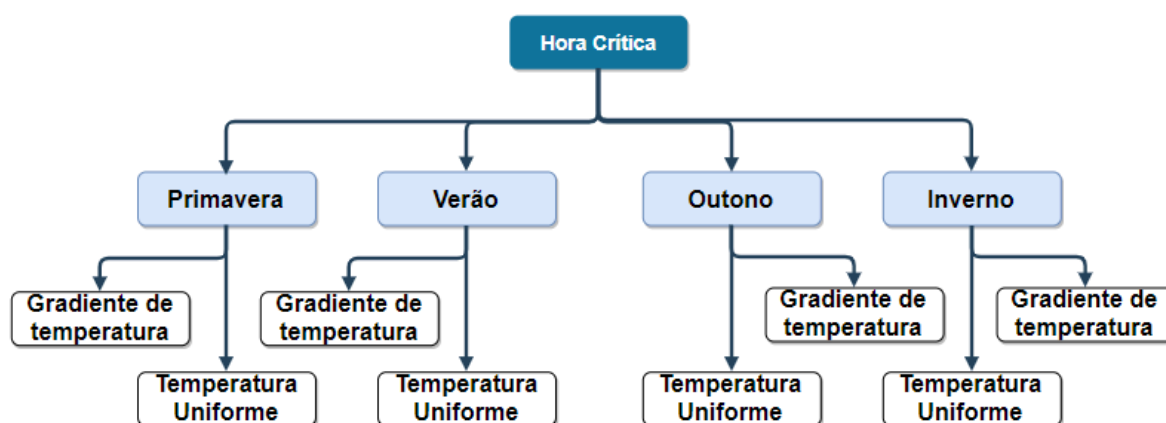
Para avaliar as simulações sob um mesmo critério foi definido o horário de 12:00 h como o período crítico da temperatura do pavimento, uma vez que apresenta, em geral, a maior taxa de radiação solar e maior temperatura do ar.

No estudo da influência do gradiente de temperaturas na vida de fadiga do pavimento através de simulações numéricas, foram realizadas modelagens com o perfil de temperaturas variável de acordo com a profundidade, comparando os resultados com modelos em que o perfil de temperaturas é constante e de valor igual a média desse gradiente.

Foram realizadas, desta forma, 4 simulações numéricas que apresentam temperaturas variando com a profundidade (1 para cada um dos dias representativos das estações) e 4

simulações em que as temperaturas serão constantes, totalizando 8 representações do pavimento. O fluxograma da Figura 13 ilustra as simulações a serem realizadas nas diferentes estações do ano.

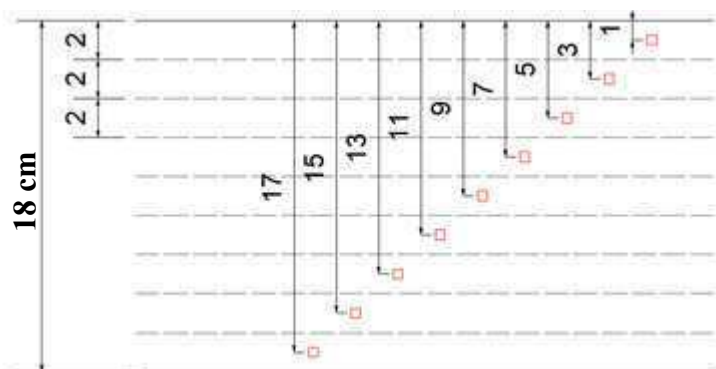
Figura 13: Fluxograma representativo das simulações realizadas



Fonte: Autor (2018)

Com a finalidade de definir o gradiente de temperaturas, o revestimento de concreto asfáltico, que possui 18 cm, foi dividido em camadas de espessura igual a 2 cm. Com as divisões da camada foi calculada a temperatura a cada 2 cm pela equação de Barber (Equação 14) e obtido o perfil ao longo da profundidade. Para o cálculo das temperaturas tomou-se a meia altura como profundidade representativa de cada camada. A Figura 14 ilustra a definição das profundidade e espessuras adotadas. A espessura de 2 cm foi definida, pois apresentou variações consideráveis na temperatura, permitindo avaliar as variações do gradiente sem sobrecarregar o programa ou comprometer a precisão do método.

Figura 14: Divisão em camadas do revestimento asfáltico para tomadas do perfil de temperaturas



Fonte: Autor (2018)

3.4 OBTENÇÃO DA MICRODEFORMAÇÃO DE TRAÇÃO

Através do *Software ViscoRoute 2.0* foram realizadas as simulações numéricas necessárias para avaliar a influência do gradiente de temperaturas no desempenho do revestimento asfáltico.

Utilizando como parâmetros de entrada do software os dados mecânicos do pavimento, apurados na etapa 1, e equação de Barber para calcular o gradiente de temperaturas no revestimento, como descrito na etapa 2, obteve-se a microdeformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico em cada uma das simulações numéricas realizadas.

Na simulação numérica, a camada asfáltica foi considerada viscoelástica, com o módulo sendo calculado em função da temperatura do material e da velocidade do carregamento. Para o cálculo do módulo foi utilizado o modelo de Huet-Sayegh. A velocidade de carregamento utilizada foi de 20 m/s (aproximadamente 10 Hz). As demais camadas do pavimento (base, sub-base e subleito) foram consideradas elásticas e os parâmetros (módulo e coeficiente de Poisson) foram obtidos por Melo (2014).

3.5 OBTENÇÃO DA VIDA À FADIGA SEGUNDO A ABORDAGEM FENOMENOLÓGICA

Para a previsão da vida à fadiga do revestimento asfáltico, empregou-se a abordagem fenomenológica (curva de Wöhler). Para tanto, utilizou-se uma regressão linear com os dados de ensaios de fadiga coletados na etapa 1. Essa regressão, contempla os valores de ensaio das temperaturas de 4 °C, 15 °C e 20 °C, gerando uma equação única (curva única).

Através desta equação geral de fadiga foram obtidos o número de repetições de eixo padrão que leva a ruptura por fadiga o revestimento asfáltico simulado. Nesta etapa buscou-se a comparação entre os resultados de desempenho na vida à fadiga para as modelizações realizadas com gradiente de temperaturas e com o perfil de temperaturas constante. Avaliou-se também o impacto da variação sazonal sobre vida à fadiga do revestimento asfáltico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

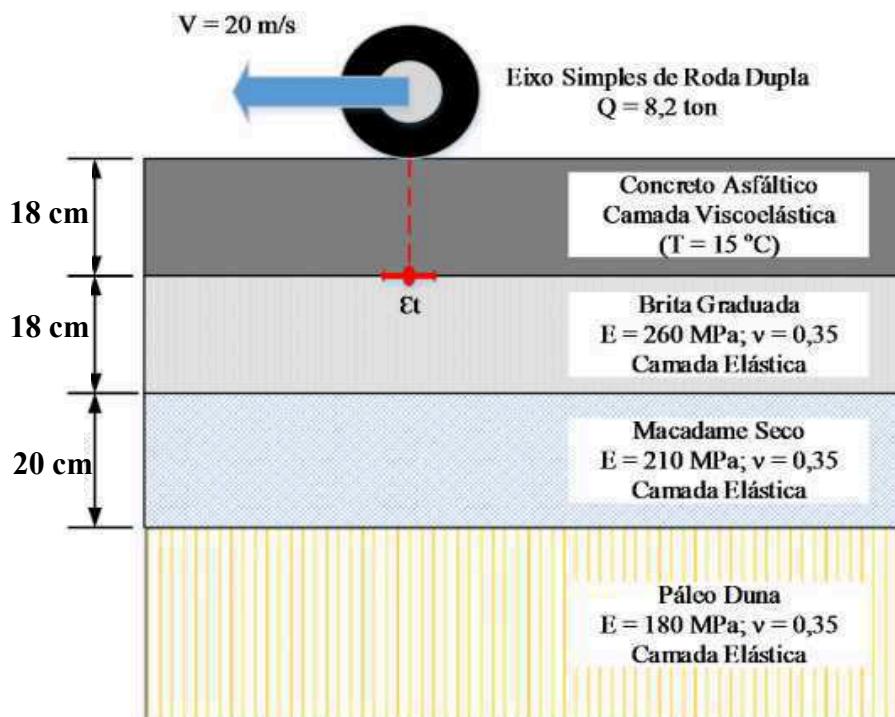
Neste capítulo apresenta-se e discute-se os resultados obtidos em cada uma das etapas do trabalho.

4.1 DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO

A estrutura do pavimento asfáltico submetido às simulações numéricas pode ser avaliada na Figura 15. Esta estrutura pertence a um dos segmentos da BR-101/SC, localizado em Araranguá, entre os km 411,5 e 412,5. A plataforma apresenta-se dividida em camadas assim dispostas:

- Camada final de terraplenagem: executado em solo de páleo duna sendo os 60 cm finais em 3 camadas, as duas camadas iniciais compactadas a 100% do proctor normal e a última compactada a 100% do proctor intermediário;
- Camada de sub-base: apresenta 20 cm de espessura, sendo executada em macadame seco e de acordo com as especificações do DEINFRA/SC;
- Camada de base: Executada de acordo com as recomendações do DNIT, com 18 cm de espessura em brita graduada (Faixa B);
- Camada de revestimento: mistura de concreto asfáltico executada em 3 camadas de 6 cm cada, totalizando a 18 cm.

Figura 15: Constituição da plataforma de pavimento utilizada na simulação numérica.



Fonte: Melo (2014)

4.1.1 Caracterização dos materiais empregados na mistura asfáltica

Os dados de caracterização da mistura asfáltica a ser estudada foram obtidos na tese de doutoramento de Melo (2014), que desenvolveu e estudou a mistura asfáltica. A composição granulométrica desta mistura, bem como os agregados e o ligante de referência são os mesmos utilizados no segmento de rodovia anteriormente descrito.

4.1.1.1 Agregados minerais

Os resultados apresentados na Tabela 1 listam as propriedades dos agregados empregados por Melo (2014) no desenvolvimento da mistura asfáltica. A determinação dos dados foi realizada através de ensaios preconizados nas normas citadas em 3.1.1.1.1.

Tabela 1: Propriedade dos agregados minerais

Propriedades dos agregados	Resultados	Critérios Superpave
Massa específica real do agregado graúdo	2,953 g/cm ³	n/a
Massa específica aparente do agregado graúdo	2,880 g/cm ³	n/a
Absorção do agregado graúdo	0,849%	n/a
Massa específica real do agregado miúdo	2,974 g/cm ³	n/a
Massa específica real do material pulverulento	2,804 g/cm ³	n/a
Angularidade do agregado graúdo	100%/100%	*100%/100% min.
Angularidade do agregado miúdo	49,18%	45% min.
Partículas planas e alongadas	9,59%	10% máx.
Teor de argila (equivalente em areia)	61,2%	50% min.
Dureza (abrasão Los Angeles)	11,58%	35-45% máx.
Sanidade	2,14%	10-20% máx.
Materiais Deletérios	0%	0,2-10% máx.

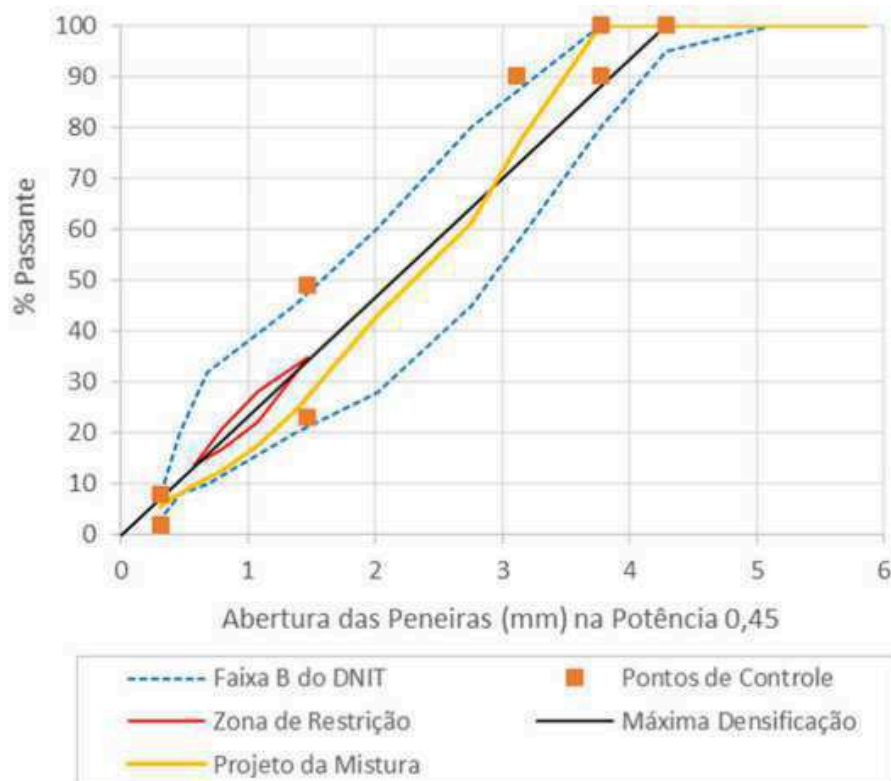
Fonte: Melo (2014)

Uma cal dolomítica do tipo CH-1 foi utilizada como filler na produção mistura asfáltica.

4.1.1.2 Composição Granulométrica

Para a composição granulométrica Melo (2014) seguiu a metodologia Superpave em sua pesquisa. É composta de brita ¾”, pedrisco, pó de pedra e filler (cal hidratada). A curva adotada para a mistura é constituída de 56,7% de agregado graúdo (passante na peneira ¾” e retido na peneira nº 4), 37,9% de agregado miúdo (passante na peneira nº 4 e retido na peneira nº 200), além de 5,4% de material pulverulento (passante na peneira nº 200 e retido no fundo). A Figura 16 apresenta o projeto da mistura de agregados formulada.

Figura 16: Composição granulométrica da mistura de agregados



Fonte: Melo (2014)

4.1.1.3 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado é o CAP 50-70. Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados com o ligante asfáltico. As normativas dos ensaios se encontram na seção 3.1.3.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico

Propriedade	Resultado
Penetração (1/10 mm)	55,00
Ponto de amolecimento (°C)	50,20
Suscetibilidade térmica	-0,92
Viscosidade aparente a 135 °C (Pa.s)	0,40
Viscosidade aparente a 150 °C (Pa.s)	0,20
Viscosidade aparente a 175 °C (Pa.s)	0,09

Fonte: Adaptado de Melo (2014)

4.1.1.4 Dosagem da mistura asfáltica

Para a dosagem da mistura, Melo (2014) executou ensaios de compactação giratória, e com os dados obtidos definiu o teor ótimo de ligante de 4,35%. Outras características da dosagem podem ser observadas na Tabela 3. A resistência da mistura ao efeito da água foi avaliada pelo ensaio de Lottman modificado, verificando-se que não houve dano ocasionado pela umidade induzida maior que 30%.

Tabela 3: Características da dosagem com teor de ligante de 4,35%

Propriedade	Resultado
Massa específica máxima (g/cm ³)	2,685
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,577
Volume de vazios (%)	4,01
Relação betume/vazios (%)	71,57
Vazios do agregado mineral (%)	14,12
Relação finos/betume efetivo	1,37

Fonte: Adaptado de Melo (2014)

4.1.1.5 Avaliação da resistência a fadiga e do comportamento reológico da mistura asfáltica

Para avaliar a mistura asfáltica segundo o módulo complexo e a resistência à fadiga Melo (2014) confeccionou placas de 60 cm x 40 cm na mesa compactadora LCPC (atual IFSTTAR) até que alcançassem a espessura de 9 cm. O resultado da compactação pode ser observado na Figura 17.

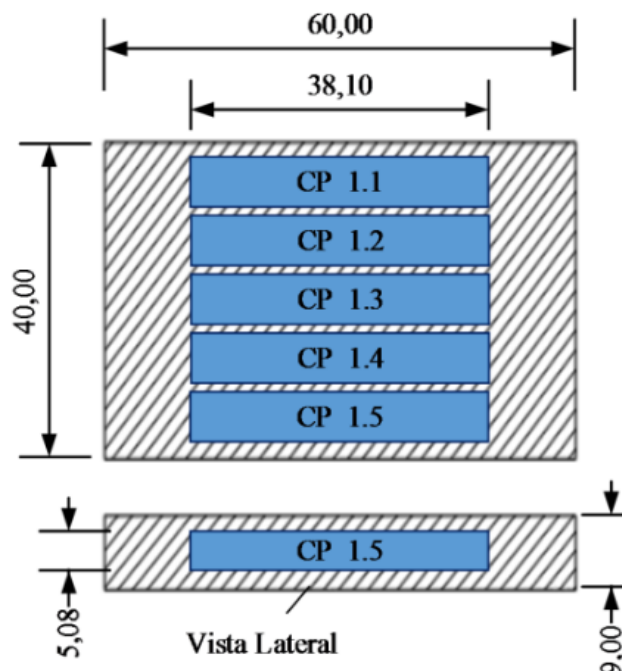
Figura 17: Placa (60 cm x 40 cm x 9cm) resultante da compactação



Fonte: Adaptado de Melo (2014)

Com o objetivo de obter as amostras finais para os ensaios serrou-se as placas para obter corpos de prova prismáticos com dimensões iguais a 5,08 cm x 6,35 cm x 38,1 cm, como ilustra a Figura 18. Em cada placa, 5 amostras prismáticas foram geradas sendo então caracterizadas em relação ao volume de vazios. As amostras obtiveram uma média de 3,85% de volume de vazios com um desvio padrão de 0,38% (MELO, 2014).

Figura 18: Projeção dos corpos de prova sobre a placa de concreto



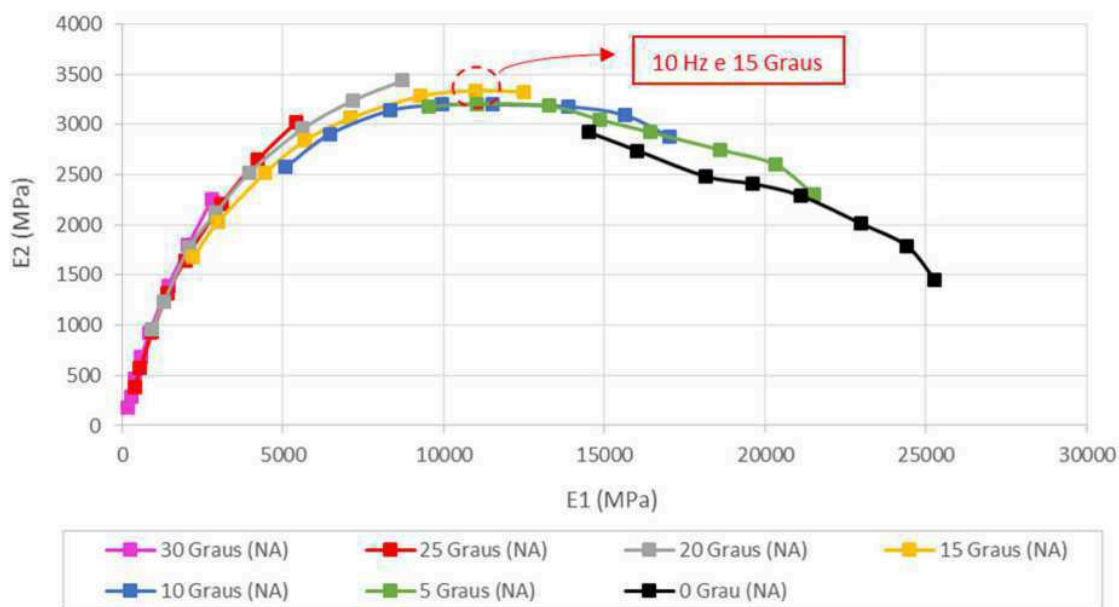
*Dimensões em centímetros

Fonte: Melo (2014)

Os ensaios de módulo complexo executados por Melo (2014) foram realizados em diversas temperaturas e frequências. Para demonstrar o comportamento reológico do material através da relação entre as componentes E_1 (componente elástica) e E_2 (componente plástica) os resultados são plotados no plano complexo Cole-Cole, apresentado na Figura 19. Esse tipo de representação permite avaliar as temperaturas e frequências críticas, isto é, as variáveis que geram uma maior parcela de componente plástica. Os testes foram realizados em sete diferentes temperaturas e cada temperatura ensaiada sob oito variações de frequência. Segundo o plano Cole-Cole, a temperatura de 15 °C com 10 Hz de carregamento seria crítica para mistura em análise, pois é o ponto que apresenta o maior valor da componente viscosa, quando comparada às demais.

Para representar fisicamente o comportamento viscoelástico obtido no conjunto de dados experimentais foi usado o modelo de Huet-Sayegh. A Tabela 4 apresenta os parâmetros do modelo encontrados através do *Software Viscoanalyse*. Através destas grandezas é possível calcular o módulo da mistura asfáltica para qualquer temperatura e frequência de carregamento, como será feito através do *Software Viscoroute 2.0*.

Figura 19: Plano complexo Cole-Cole



Fonte: Melo (2014)

Tabela 4: Parâmetros viscoelásticos do modelo de Huet-Sayegh utilizados na simulação

Parâmetros viscoelásticos	
E_∞	33864,1
ν	0,3
E_0	1,23756
k	0,166642
h	0,56079
δ	1,76482
A_0	3,2907
A_1	-0,487376
A_2	0,0034478

Fonte: Melo (2014)

4.1.1.5.1 Resistência à fadiga – Critério Convencional

Os ensaios de fadiga foram realizados por Melo (2014) e Pereira (2017) no aparato de flexão a quatro pontos, sob deformação controlada, carregamento sinusoidal, frequência de carregamento de 10 Hz e temperaturas de 4 °C, 15 °C e 20 °C. O critério para o término de cada ensaio foi definido como a redução de metade do módulo complexo inicial, medido no

centésimo ciclo. A Tabela 5 agrega os dados de microdeformação inicial o número de ciclos que caracteriza a ruptura segundo o critério convencional e os módulos iniciais e finais de cada corpo de prova.

Tabela 5: Determinação da ruptura e número de ciclos segundo o critério convencional

CP	Microdeformação inicial	Módulo inicial (100º ciclo) (MPa)	Módulo final (MPa)	Número total de ciclos
Temperatura de 4 °C (PEREIRA, 2017)				
1	138	22813	11405	174757
2	145	27083	13541	86390
3	204	28183	14090	28954
4	113	26938	13467	574196
5	157	24077	12033	58243
6	158	23662	11826	57373
7	115	26532	13264	829623
8	125	24705	12351	199642
9	215	25572	12779	32810
Temperatura de 15 °C (MELO, 2014)				
10	150	12520	6259	103997
11	100	11621	5809	929186
13	200	12221	6110	34582
14	150	11370	5684	117539
15	150	12535	6266	165773
16	200	11249	5713	32164
Temperatura de 20 °C (MELO, 2014)				
18	150	7959	3980	204386
19	100	8288	4143	1719490
20	200	7474	3736	63775
21	150	7867	3933	202653
22	200	8246	4123	44220
23	100	8481	4240	1483987

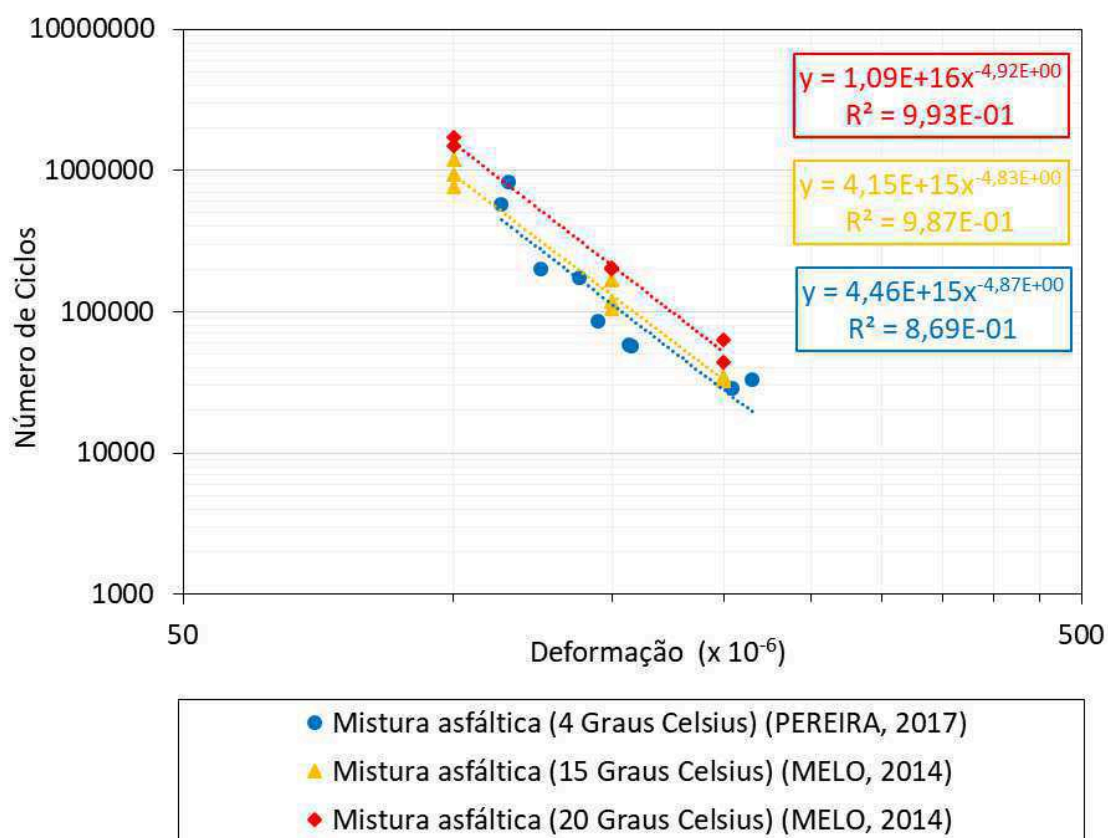
Fonte: Adaptado de Pereira (2017)

4.1.1.5.2 Obtenção da curva de fadiga pela abordagem fenomenológica

A abordagem fenomenológica gera um modelo não mecanicista de fadiga, pois relaciona diretamente a microdeformação e o número de ciclos quando atingido o critério de ruptura convencional.

Para conceber o modelo de fadiga segundo essa abordagem, Melo (2014) e Pereira (2017) fixaram o ponto de colapso da amostra quando esta reduz 50% do seu módulo inicial, finalizando o ensaio. O número de ciclos para a ruptura é tomado diretamente do programa. O modelo é a equação matemática que representa os dados experimentais. A Figura 20 apresenta as curvas de fadiga obtidas por Melo (2014) para 15 °C e 20 °C e a curva obtida por Pereira (2017) para 4 °C.

Figura 20: Modelo de fadiga segundo a abordagem fenomenológica

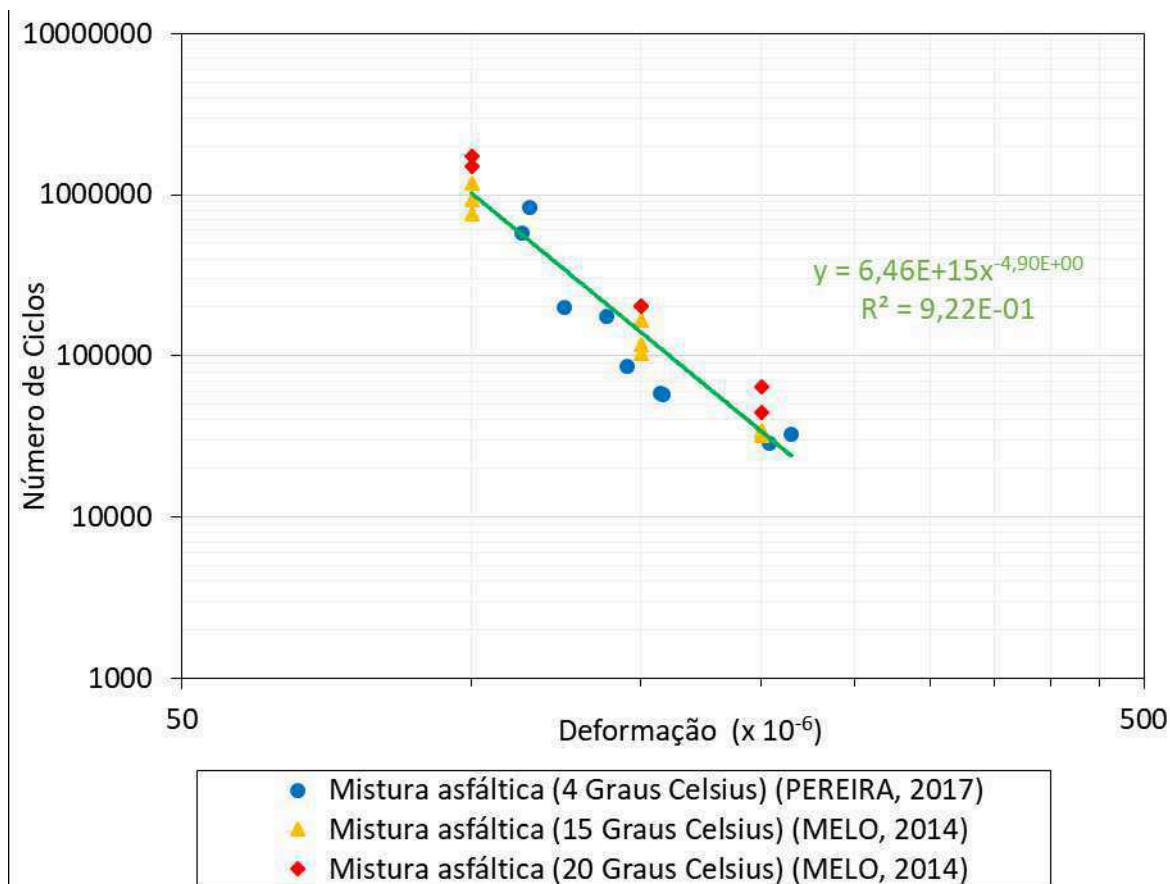


Fonte: Pereira (2017)

Uma equação de fadiga única foi elaborada com base nos dados mencionados, tornando possível a obtenção do número de ciclos para ruptura a partir da microdeformação de

amostra em qualquer temperatura, sob carregamento sinusoidal e frequência de carregamento de 10 Hz. A Figura 21 apresenta a conformação equação plotada em escala logarítmica.

Figura 21: Modelo de fadiga geral segundo a abordagem fenomenológica



A escolha dos ensaios de fadiga executados nas temperaturas de 4 °C, 15 °C e 20 °C para a obtenção de uma única lei de fadiga, baseia-se no plano cole-cole apresentando na Figura 19. Os ensaios de fadiga nestas temperaturas apresentam maior parcela da componente viscosa (E_2) do módulo complexo para a frequência de 10 Hz. Esta parcela representa a energia dissipada durante o carregamento. As situações com maior módulo de perda (E_2) são, por conseguinte, as críticas do ponto de vista da vida à fadiga do material asfáltico.

O coeficiente de correlação R^2 é um indicativo da representatividade do modelo, sugerindo o quão fortemente relacionadas estão as variáveis. Coeficientes R^2 próximos a 1 indicam grande correlação e melhor representatividade dos dados experimentais pelo modelo. O indicador obtido na regressão do modelo geral de fadiga é de 0,922, com correlação forte (> 0,8) segundo a classificação de Karl Pearson.

A equação matemática que representa a resistência à fadiga do material está descrita na Equação 21.

$$N_f = 6,46 \times 10^{15} \times \varepsilon^{-4,90} \quad (21)$$

Onde:

N_f é a vida de fadiga do material, e,

ε é a microdeformação atuante.

4.2 COLETA DE DADOS METEOROLÓGICOS

Para a estimativa do perfil de temperaturas da mistura asfáltica através do modelo de Barber necessita-se de informações climatológicas, referentes ao ambiente em que o pavimento está inserido, e parâmetros físicos da mistura asfáltica

4.2.1 Fatores climáticos

Os dados de temperatura média do ar, radiação solar, e velocidade do vento foram obtidos da estação meteorológica automática localizada em Araranguá, através do banco de dados do INMET pelo Sistema de Informações Hidro-Meteorológica. O intervalo de tempo de análise destes dados inicia-se em 22/09/2017 e termina em 21/09/2018, totalizando 365 dias. Para a avaliação da influência da sazonalidade na resistência à fadiga, foram realizadas as simulações numéricas em cada estação do ano:

- 05/11/2017 para a Primavera;
- 03/02/2018 para o verão;
- 05/05/2018 para o Outono; e,
- 06/08/2018 para o Inverno.

É importante salientar que os dias selecionadas para cada estação devem apresentar valor de precipitação igual a 0 mm, uma vez que a equação de Barber não contempla a influência da água nos fenômenos de transferência de calor da mistura asfáltica com o ambiente.

Os dados climatológicos horários referentes a estes dias são encontrados no APÊNDICE A – Dados meteorológicos de 07/11/2017 e 03/02/2018 e no APÊNDICE B – Dados meteorológicos de 05/05/2018 e 08/08/2018. A Tabela 6 resume os parâmetros climáticos utilizados no modelo de Barber (Equação 14).

Tabela 6: Dados climáticos coletados para a utilização na equação de Barber

Estação	T_a (°C)	T_r (°C)	V (km/h)	I (kcal/m ² dia)
Primaveira	22,4	7,7	14,4	5146,7
Verão	26,1	9,0	15,1	5673,9
Outono	26,0	6,2	9,7	2413,0
Inverno	17,9	11,2	15,5	3910,0

Onde:

T_a é a temperatura do ar a 1 m do solo, às 12:00 h;

T_r é a amplitude da variação de temperatura durante o dia;

V é a velocidade média do vento às 12:00 h; e

I é radiação solar recebida pela superfície durante o dia.

4.2.2 Propriedades físicas do pavimento

O modelo matemático proposto em Barber (1957) utiliza fenômenos de transferência de calor para a predição do perfil de temperatura em qualquer profundidade do revestimento asfáltico. Propriedades físicas como a massa específica da mistura asfáltica estudada e constantes inerentes ao material, relacionadas a fenômenos térmicos, devem ser levantadas para que a modelagem seja fiável.

Motta (1979) analisa em sua tese a sensibilidade da equação de Barber, variando diversos coeficiente e comparando com os resultados de medição instrumentada. Fica demonstrado que a condutividade térmica k , por exemplo, apresenta pequena influência na temperatura calculada. A adoção de valores da literatura para esta constante é justificada. Por não dispor de aparatos para a definição das demais constantes térmicas da mistura asfáltica, e visando a simplificação do processo de obtenção do gradiente de temperaturas, foram adotados valores conforme a bibliografia para: calor específico, coeficiente de absorção solar e de perda por re-irradiação, elencados na Tabela 7. A massa específica da mistura asfáltica foi obtida no trabalho de Melo (2014).

Tabela 7: Parâmetros físicos utilizados no modelo

Parâmetro	Valor Adotado
Condutividade Térmica (k)	1,042 kcal/m.h.°C
Calor Específico (c)	0,22 kcal/kg.°C
Coef. de Absorção de Radiação Solar (b)	0,95
Coef. de Perda por Re-irradiação (p)	0,67
Massa específica (w)	2570 kg/m ³

Fonte: Barber (1957); Medina; Motta (2005); Melo (2014); Motta (1979)

4.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E DEFINIÇÃO DO GRADIENTE DE TEMPERATURAS NO REVESTIMENTO ASFÁLTICO

Com a definição das constantes físicas da mistura asfáltica selecionada para análise, e possuindo os dados climatológicos da região de implantação da rodovia foi possível definir, através da equação de Barber (Equação 14), o perfil de temperaturas para qualquer profundidade da camada de revestimento asfáltico, a qualquer hora do dia. As Tabela 8 e 9 resumem as temperaturas calculadas pelo modelo nas diferentes estações do ano, em cada camada anteriormente delimitada. As mesmas tabelas apresentam também a média das temperaturas do gradiente obtido utilizada para a comparação da vida de fadiga por meio de simulações numéricas.

A Figura 22 permite visualizar como a sazonalidade afeta o gradiente de temperaturas no pavimento para a hora de estudo. Observa-se que as curvas de variação de temperatura do modelo respeitam os dados climatológicos da estação de Araranguá, levantados nos apêndices A e B. A cidade encontra-se num clima mesotérmico úmido de verões quentes (PERON; MAAR; NETTO, 2011), sem a presença de estação seca e com atuação intensiva da massa polar atlântica durante o Inverno. Espera-se então que o pavimento apresente temperaturas elevadas no Verão e temperaturas menores no Inverno, já que estas estações são representativas dos eventos extremos do clima na cidade.

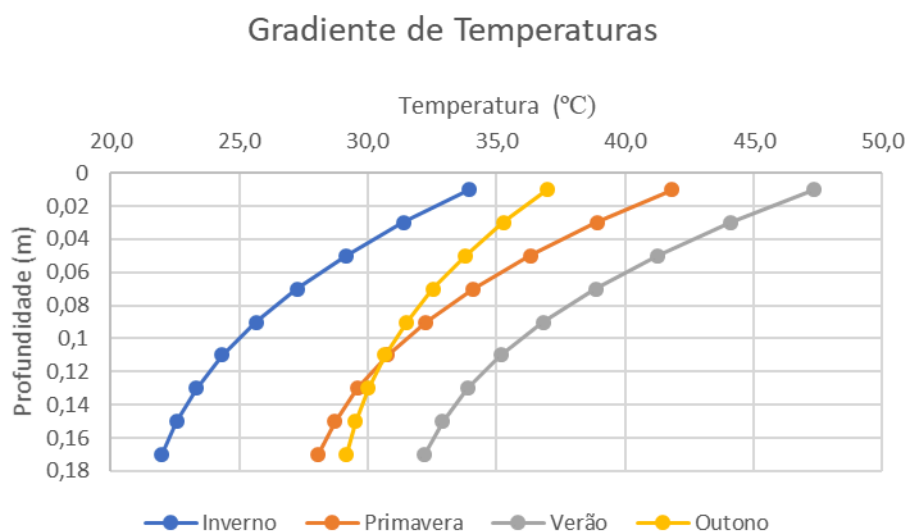
Tabela 8: Temperaturas do pavimento calculadas para às 12:00 h - Primavera e Verão

Profundidade (m)	Primavera		Verão	
	Gradiente (°C)	Temperatura média (°C)	Gradiente (°C)	Temperatura média (°C)
0,01	41,82	33,40	47,33	38,06
0,03	38,90		44,12	
0,05	36,32		41,28	
0,07	34,11		38,85	
0,09	32,26		36,82	
0,11	30,77		35,17	
0,13	29,60		33,88	
0,15	28,71		32,91	
0,17	28,08		32,20	

Tabela 9: Temperaturas do pavimento calculadas para às 12:00 h - Outono e Inverno

Profundidade (m)	Outono		Inverno	
	Gradiente (°C)	Temperatura média (°C)	Gradiente (°C)	Temperatura média (°C)
0,01	36,96	32,16	33,92	26,62
0,03	35,28		31,39	
0,05	33,80		29,16	
0,07	32,54		27,24	
0,09	31,50		25,64	
0,11	30,66		24,35	
0,13	30,01		23,33	
0,15	29,52		22,56	
0,17	29,17		22,00	

Figura 22: Influência da variação sazonal no perfil de temperaturas



Fonte: Autor (2018)

4.4 OBTENÇÃO DA MICRODEFORMAÇÃO DE TRAÇÃO

Após a definição da equação geral de fadiga pela abordagem fenomenológica e do gradiente de temperaturas no revestimento asfáltico na hora crítica para cada estação do ano, parte-se para a designação da vida útil à fadiga do revestimento na estrutura do pavimento. Para tal, a microdeformação de tração atuante na superfície inferior da camada de revestimento necessita ser determinada. O *Software ViscoRoute 2.0* foi utilizado para a obtenção da microdeformação. Este software oferece a solução para um modelo estrutural multicamadas no espaço semi-infinito sob diversos carregamentos utilizando a Transformada Rápida de Fourier, permitindo a adoção do comportamento viscoelástico de Huet-Sayegh para as camadas.

A simulação numérica necessita de três grupos de informação distintos: estrutura do pavimento, temperatura do pavimento e o carregamento atuante. As características da estrutura do pavimento foram definidas conforme a Figura 15 e mediante a inserção de parâmetros viscoelásticos da mistura asfáltica, apresentados na Tabela 4, definidos pela modelização de Huet-Sayegh; o perfil de temperaturas e a temperatura média do revestimento para cada estação do ano foram calculados, com resultados presentes nas Tabela 8 e Tabela 9. A Figura 23 exemplifica a entrada destes dados no *Software Viscoroute 2.0*.

Quanto ao carregamento, foi considerado o eixo padrão de 8,2 toneladas, resultando em um carregamento de roda dupla, com distância de 32 cm entre as rodas e carga de 2050 kgf por roda. A Figura 12 apresentada anteriormente ilustra a configuração do carregamento

utilizado nas simulações e a Figura 24, a inserção dos dados de carregamento no software de simulação.

Conforme a Figura 25, o valor crítico da microdeformação de tração foi tomado no ponto (0,0), correspondente a posição central entre as duas rodas do eixo, região de ocorrência de sobreposição dos efeitos causados pelo carregamento. Para obter o valor crítico de microdeformação no revestimento da plataforma pavimento, a deformação de tração é tomada na fibra mais inferior da camada, a 18 cm da superfície.

Figura 23: Entrada dos dados da estrutura e do gradiente de temperaturas no *Viscoroute 2.0*

Structure | Chargement | Résultats

C:\Users\Vinicius\Desktop\Arquivos TCC Vinicius\Viscoroute\Primavera\Primavera12final.str

Nb de couches: 12

Revestimento

	Z (m)	Epais. (m)	Module E (MPa)	Coef. de Poisson	Mas. Vol. (kg/m ³)	Type de matériau	Comport.	Type de liaison	Module E0 (MPa)	T (°C)	k (loi H-S)	h (loi H-S)	delta (loi H-S)	A0	A1	A2
1	0.020	0.020	33864.10000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	1.23756	41.820	0.167	0.561	1.765	3.291	-0.487	0.003448
2	0.040	0.020	33864.10000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	1.23756	38.900	0.167	0.561	1.765	3.291	-0.487	0.003448
3	0.060	0.020	33864.10000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	1.23756	36.320	0.167	0.561	1.765	3.291	-0.487	0.003448
4	0.080	0.020	33864.10000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	1.23756	34.110	0.167	0.561	1.765	3.291	-0.487	0.003448
5	0.100	0.020	33864.10000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	1.23756	32.260	0.167	0.561	1.765	3.291	-0.487	0.003448
6	0.120	0.020	33864.10000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	1.23756	30.770	0.167	0.561	1.765	3.291	-0.487	0.003448
7	0.140	0.020	33864.10000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	1.23756	29.600	0.167	0.561	1.765	3.291	-0.487	0.003448
8	0.160	0.020	33864.10000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	1.23756	28.710	0.167	0.561	1.765	3.291	-0.487	0.003448
9	0.180	0.020	33864.10000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	1.23756	28.080	0.167	0.561	1.765	3.291	-0.487	0.003448
10	0.360	0.180	260.00000	0.350	2480.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
11	0.560	0.200	210.00000	0.350	2200.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
12		infini	180.00000	0.350	1850.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000

Subleito

Sub-base

Base

Fonte: *Viscoroute 2.0*

Figura 24: Dados do carregamento do pavimento no *ViscoRoute 2.0*

ViscoRoute 2.0 (LCPC-ENPC)

Fichier Outils Aide

C:\Users\Vinicius\Desktop\Arquivos TCC Vinicius\Viscoroute\Vinicius - CARREGAMENTO.cha

Vitesse de charge (m/s): 20.0

Nombre de charges: 2

Nb cas d'observation: 1

Velocidade

Número de cargas

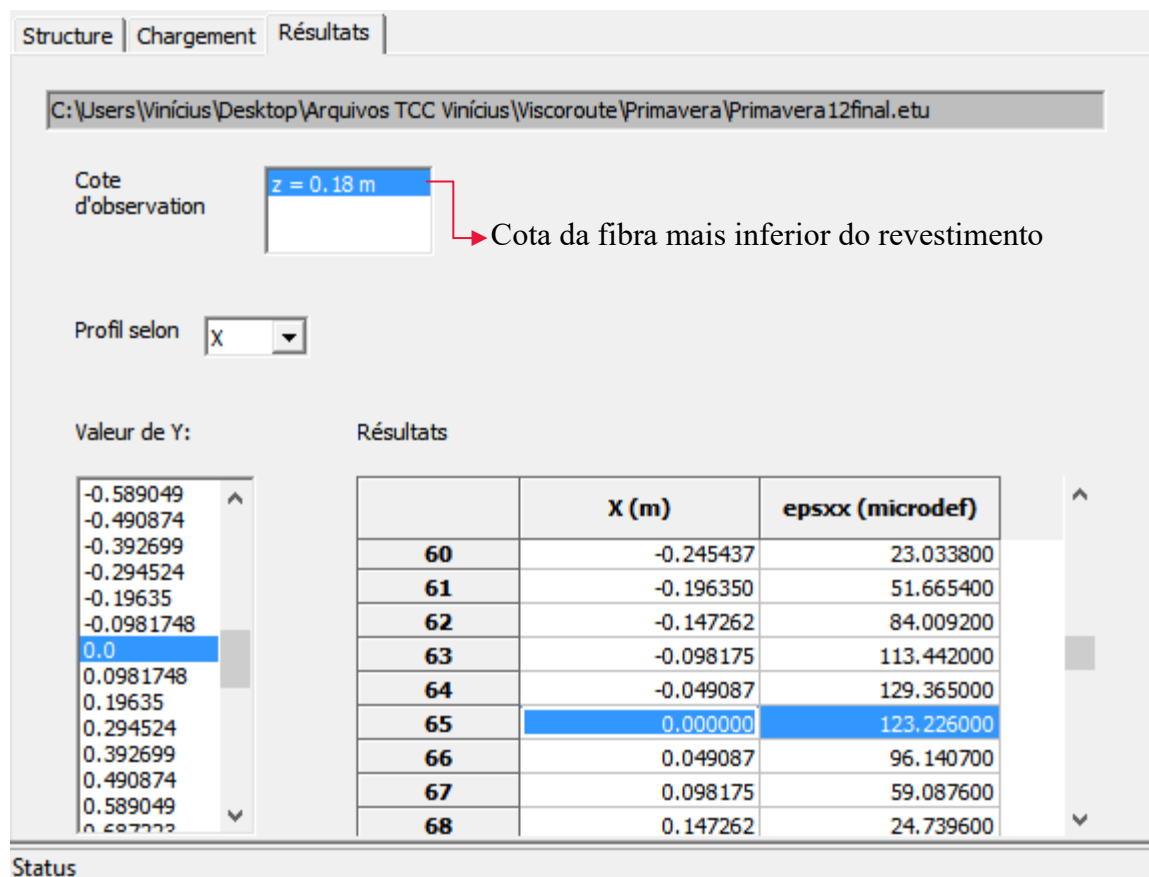
	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Type de charge	a (m)	b (m)	x (m)	y (m)
1	0.000	0.000	20500.000	Ellipse	0.108	0.108	0.000	-0.160
2	0.000	0.000	20500.000	Ellipse	0.108	0.108	0.000	0.160

Carregamento vertical

	Cote (m)	Sortie
1	0.18000	epsxx (microdef)

Fonte: *Viscoroute 2.0*

Figura 25: Apresentação do valor crítico de microdeformações no *ViscoRoute 2.0* para simulação realizada com gradiente de temperaturas para a primavera



Fonte: *Viscoroute 2.0*

Os resultados de avaliação da microdeformação de tração obtidos através da simulação são vistos na Tabela 10.

Tabela 10: Microdeformações de tração críticas do revestimento para as 12:00 h para as diferentes simulações realizadas

Microdeformação (µm/m)		
Estação	Gradiente de Temperaturas	Temperatura média
Primavera	123,226	148,176
Verão	152,261	181,595
Outono	124,506	136,776
Inverno	87,964	100,115

O comportamento sazonal das deformações no pavimento obtidas pelo software está dentro do padrão esperado, uma vez que, para a mistura asfáltica, o aumento na temperatura é proporcional às deformações. Têm-se então, para o Verão e Inverno, valores extremos de ϵ_t , com maiores deformações na estação quente e menores na estação fria. Para as estações da Primavera e Outono, tipicamente amenas, as deformações são de valor intermediário.

Nota-se que a grandeza das microdeformações apresenta em todas as estações resultados maiores quando a temperatura do pavimento é considerada como uma média do perfil de temperaturas.

O *Software Viscoroute 2.0* fornece os resultados das simulações também de forma gráfica (Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33). O eixo das abscissas apresenta a distância a que se encontra o eixo padrão do ponto (0,0), utilizado para definição da deformação crítica. Já o eixo das ordenadas apresenta a amplitude da deformação que o revestimento está sofrendo com a passagem do eixo a 72 km/h (20 m/s). Observa-se, através destas figuras que a fibra inferior do revestimento asfáltico sofre uma deformação de compressão antes e depois de ter seu pico de tração no ponto analisado. Esse efeito é causado pela passagem do eixo sobre a plataforma do pavimento. É esta alternância de sentidos de solicitação que faz o revestimento asfáltico falhar por fadiga.

Figura 26: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob gradiente de temperaturas na Primavera

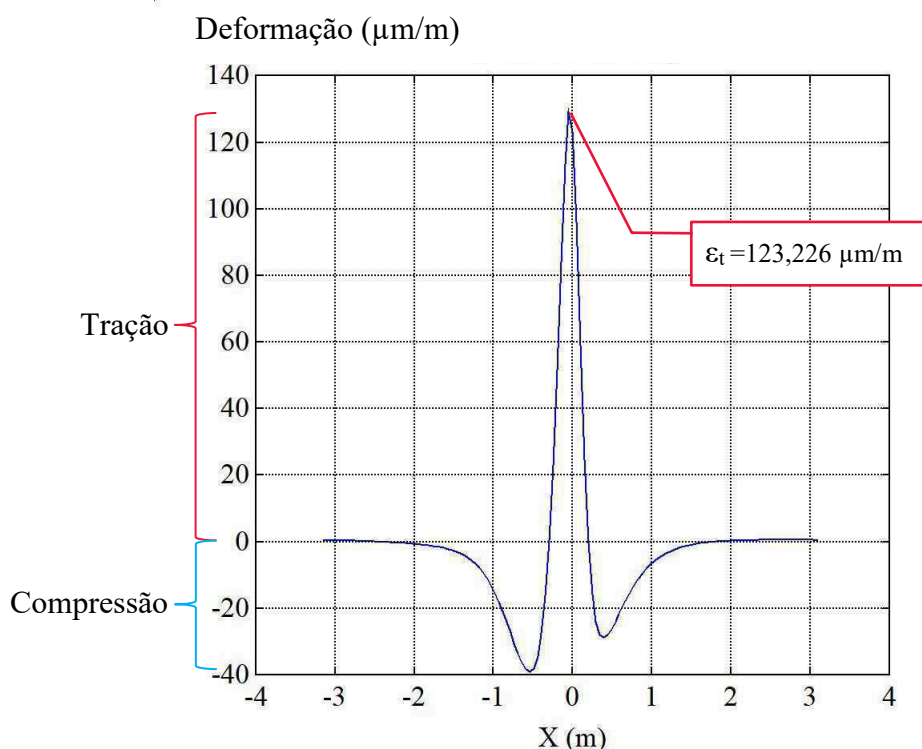


Figura 27: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob média do gradiente de temperaturas na Primavera

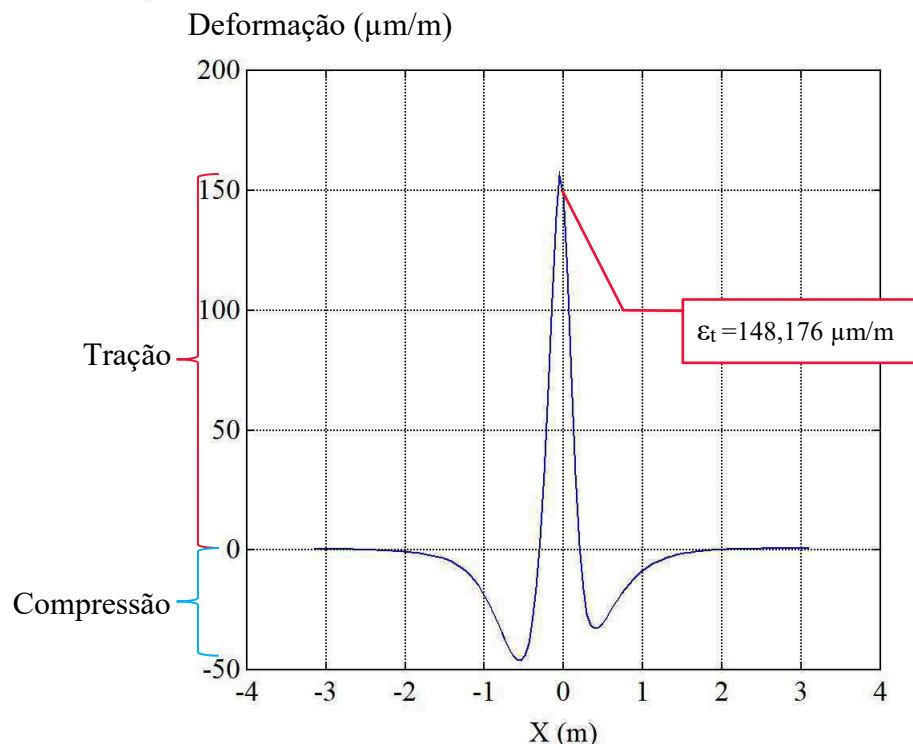


Figura 28: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob gradiente de temperaturas no Verão

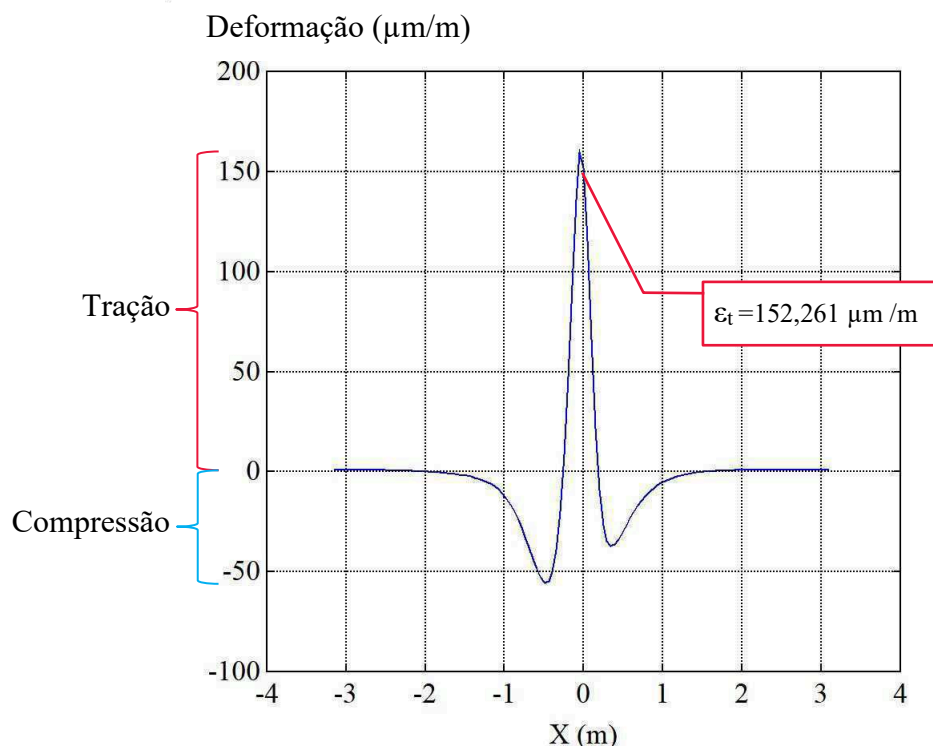


Figura 29: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob média do gradiente de temperaturas no Verão

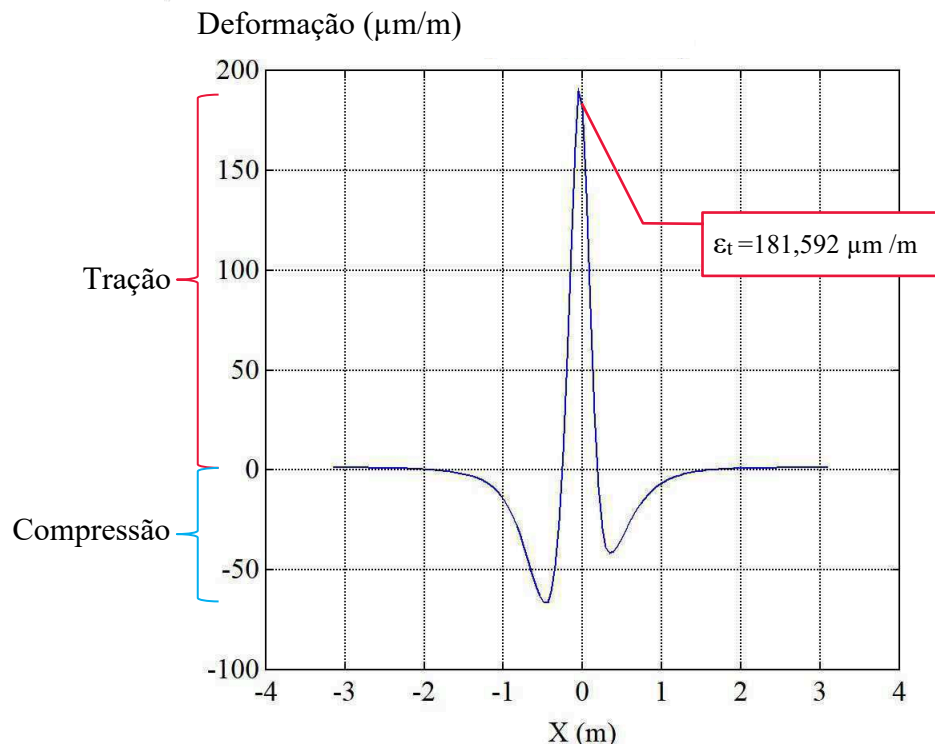


Figura 30: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob gradiente de temperaturas no Outono

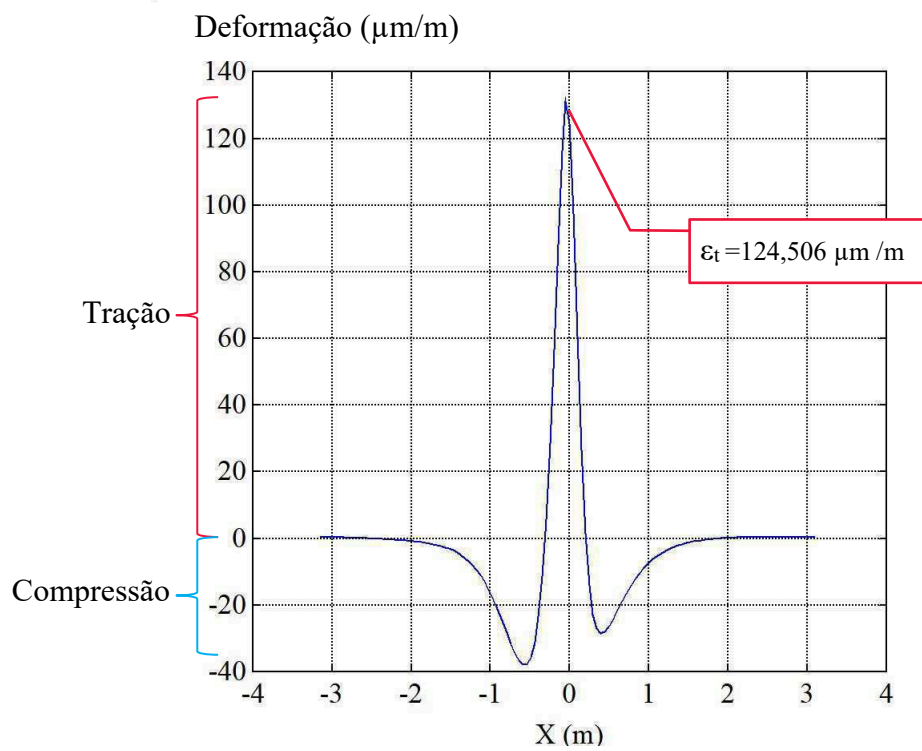


Figura 31: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob média gradiente de temperaturas no Outono

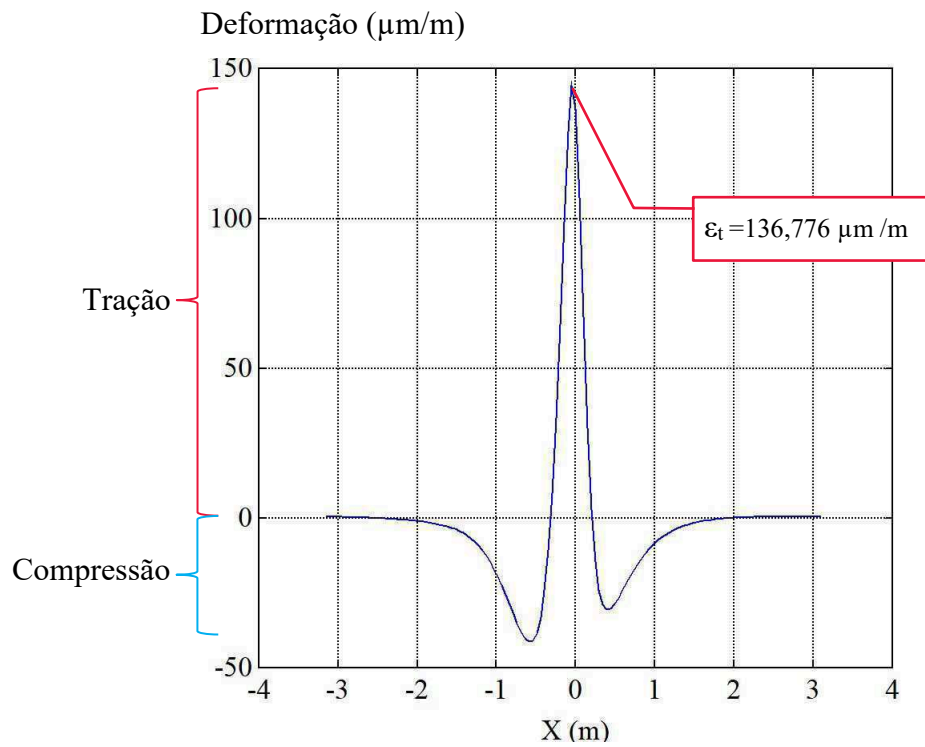


Figura 32: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob gradiente de temperaturas no Inverno

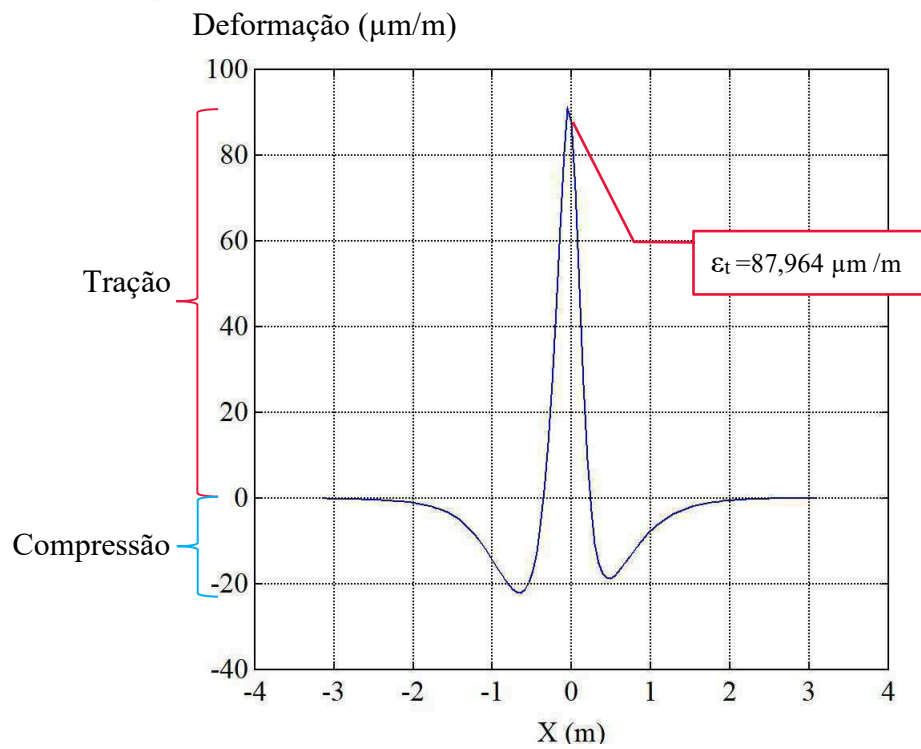
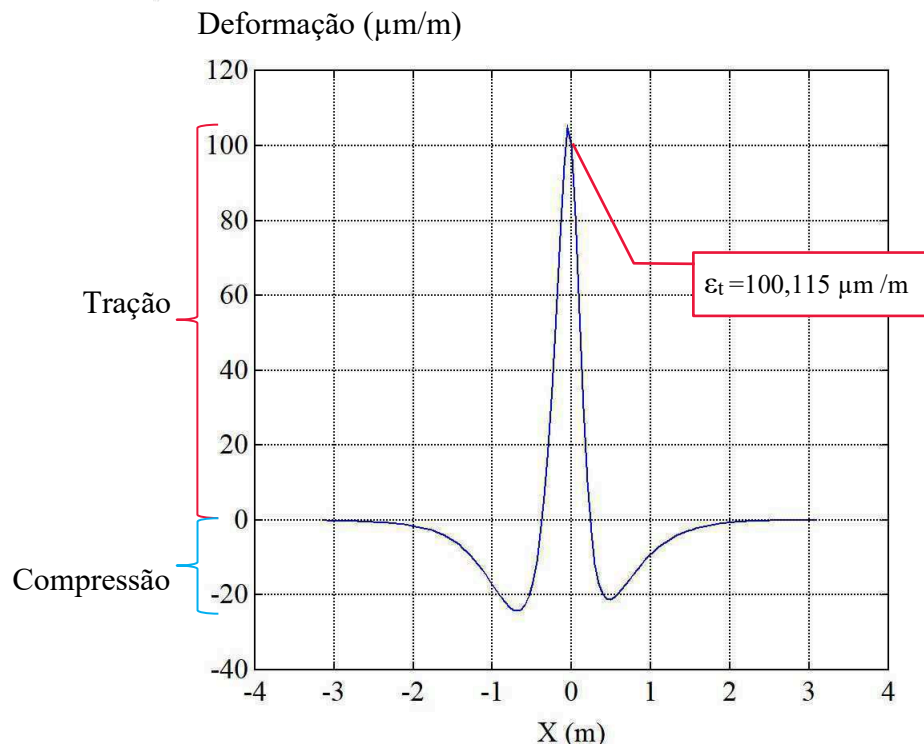


Figura 33: Variação da deformação da fibra inferior do revestimento sob média do gradiente de temperaturas no Inverno



4.5 OBTENÇÃO DA VIDA À FADIGA SEGUNDO A ABORDAGEM FENOMENOLÓGICA

Para proceder com a análise, que considera a falha do material pela degradação da rigidez, tomou-se a equação de regressão enunciada na Equação 21, a fim de obter o número de ciclos de eixo padrão de carregamento correspondentes a ruptura do material por fadiga para cada microdeformação de tração obtida no item 4.4. A Tabela 11 elenca os resultados obtidos.

Tabela 11: Vida de fadiga segundo a abordagem fenomenológica

Estação	Gradiente de Temperaturas		Temperatura Média	
	Microdeformação (10^{-6} m/m)	N_f	Microdeformação (10^{-6} m/m)	N_f
Primavera	123,226	3,68E+05	148,176	1,49E+05
Verão	152,261	1,30E+05	181,595	5,50E+04
Outono	124,506	3,50E+05	136,776	2,21E+05
Inverno	87,964	1,92E+06	100,11 ^o 5	1,02E+06

Avaliando o pavimento nas diferentes estações do ano, e considerando o gradiente de temperaturas no revestimento, percebe-se novamente que a sazonalidade é um parâmetro importante para o fenômeno de fadiga, já que o número de ciclos obtidos para o Inverno é 14,7 vezes superior ao calculado para o Verão. A ordem de grandeza do N_f para a Primavera e Outono é a mesma, e intermediária às estações extremas, representando aproximadamente 3 vezes o N_f do Verão e 0,2 vezes o N_f do Inverno.

O comportamento geral da vida de fadiga do pavimento, considerando a temperatura como a média das temperaturas do gradiente, não se modifica. O número de carregamentos cíclicos do Inverno fica 18,5 vezes superior ao calculado para o Verão. Para além, a ordem de grandeza do N_f , comparado ao Verão, é 4 vezes superior no Outono e 2,7 vezes superior na Primavera.

Quando se compara a variação do N_f para a mesma estação do ano para as duas condições de temperatura simuladas, vê-se que a vida de fadiga do material é inferior quando a temperatura da camada de revestimento é considerada uniforme. A consideração da temperatura média do gradiente em todo revestimento é, como observado, mais conservadora, obtendo valores de N_f aproximadamente 2 vezes menores, no paralelo entre os dois métodos.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse capítulo apresenta as conclusões e considerações acerca dos objetivos iniciais propostos no trabalho. A partir dos achados, pode-se concluir:

- A equação de predição do perfil de temperaturas de Barber apresentou resultados satisfatórios mesmo sem a disposição das constantes específicas do material estudado e utilizando o referencial bibliográfico para a suprir esta falta.
- É possível estimar facilmente as temperaturas internas da camada de revestimento asfáltico com os dados climatológicos da região de implantação da rodovia.
- Através da simulação numérica, realizada no *Software ViscoRoute 2.0*, aferiu-se que a deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico aumenta com o incremento da temperatura.
- A variação sazonal da temperatura interfere na vida de fadiga do pavimento, uma vez que estas mudanças possuem implicação no número de ciclos de carregamento até a ruptura do revestimento.
- A vida útil do revestimento asfáltico quanto à fadiga, é maior no Inverno e menor no Verão, para ambas abordagens de temperatura interna do revestimento estudadas.
- O revestimento asfáltico se mostrou extremamente dependente da temperatura que ele é exposto, caracterizando sua termo susceptibilidade.
- Admitir uma temperatura única para a camada de revestimento asfáltico pode levar ao dimensionamento impreciso do pavimento nos critérios de fadiga, já que esta uniformidade não representa o comportamento em serviço.
- Métodos racionais de dimensionamento de pavimentos devem levar em conta o clima da região, as estações do ano e as variações diárias do gradiente de temperaturas do revestimento asfáltico.

5.1 RECOMENDAÇÕES

Seguem algumas sugestões consideradas importantes e que não estão no escopo do estudo.

- Estimar a vida de fadiga da mistura asfáltica por modelos mecanicistas, como a abordagem da energia dissipada acumulada, por exemplo.

- Obter o perfil de temperaturas do revestimento através de medição instrumentada ou através de outros modelos físico-matemáticos para comparar e aprimorar as simulações.
- Verificar em outros estudos o número de ciclos que leva a falha por fadiga para o mesmo trecho da rodovia escolhida analisando os critérios de ruptura e temperatura escolhidos pelo autor.
- Utilizar o Guia de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos (MEPDG), desenvolvido pela AASHTO para simular o mesmo trecho da rodovia e comparar os resultados obtidos através do *Viscoroute 2.0*.

REFERÊNCIAS

AL-KHATEEB, Ghazi; SHENOY, Aroon. A Distinctive Fatigue Failure Criterion. **Journal Of The Association Of Asphalt Paving Technologists**. Saint Paul, p. 585-622. mar. 2004.

ALBAYATI, Amjad; MAHIR, Ahmad. Temperature Prediction Model for Asphalt Concrete Pavement. In: THE 14TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON PAVEMENT ENGINEERING AND INFRASTRUCTURE, 14., 2015, Liverpool. **Proceeding**. Liverpool: Ljmu, 2017. p. 1 - 10. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/313996377_Temperature_Prediction_Model_for_Ashphalt_Concrete_Pavement>. Acesso em: 21 nov. 2018.

ALMEIDA, Adosindro Joaquim de. **Avaliação da Influência da Ação da Água e da Temperatura no Comportamento Reológico e no Desempenho Mecânico das Misturas Asfálticas**. 2017. 334 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188995/PECV1107-T.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 321-07: Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending**. Washington, 2017. 13 p.

ANDERSON, David A. et al. Evaluation of Fatigue Criteria for Asphalt Binders. **Journal Of The Transportation Research Board**. Web, p. 48-56. 01 jan. 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.3141/1766-07>>. Acesso em: 04 set. 2018.

ARIAWAN, I. Made Agus; SUBAGIO, Bambang Sugeng; SETIADJI, Bagus Hario. Development of Asphalt Pavement Temperature Model for Tropical Climate Conditions in West Bali Region. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 125, p.474-480, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.126>

BAAJ, Hassan. **Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés**. 2002. 267 f. Tese (Doutorado) - Curso de Génie Civil, L'institut National Des Sciences Appliquees de Lyon, Lyon, 2002. Disponível em: <<http://theses.insa-lyon.fr/publication/2002ISAL0034/these.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 576 p. 576 f.

BARBER, Edward S.. Calculation of Maximum Pavement Temperatures From Weather Reports. **Highway Research Board**. Washington D.c., p. 1-8. ago. 1957. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbbulletin/168/168-001.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

BARRA, Breno Salgado. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. 327 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/93198>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Abeda, 2008. 504 p.

BRASIL. Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coord. (Org.). **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentacao%20E7%E3o_05.12.0. Acesso em: 05 maio 2018.

BRASIL. Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas (Org.). **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 2005. 310 p. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/..%5Carquivos_internet%5Cipr%5Cipr_new%5Cmanuais%5CManual_de_Restauracao.pdf. Acesso em: 25 jul. 2018.

CABRERA, Homero Carrión; TOCACHI, Boris Ochoa. **Modelación del hormigón asfáltico y obtención de sus parámetros mediante técnicas de optimización**. 2011. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2011. Disponível em: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/748>. Acesso em: 21 nov. 2018.

CHABOT, Armelle et al. ViscoRoute 2.0 A: Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement. **Road Materials And Pavement Design**. Web, p. 227-250. 19 set. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690274>. Acesso em: 28 ago. 2018.

CHAO, Jing; JINXI, Zhang. Prediction Model for Asphalt Pavement Temperature in High-Temperature Season in Beijing. **Advances In Civil Engineering**. London, p. 1-11. 26 jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/1837952>. Acesso em: 21 nov. 2018.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (Brasil) (Org.). **Anuário CNT do Transporte - Estatísticas consolidadas**. Brasília, 2017. 229 p. Disponível em: <http://anuariodotransporte.cnt.org.br>. Acesso em: 03 jun. 2018.

COUTINHO, João Camilo Penna. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método mecanístico - empírico aplicada a um trecho**. 2011. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. 2009. 581 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, 2009. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/9601>. Acesso em: 21 nov. 2018.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanísticoempírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

IBARRA, Jorge Alarcón. **Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta**. 2003. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Tècnica Superior D'enginyers de Camins, Canals I Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2003. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2117/93221>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATED PAVEMENT TESTING, 3., 2008, Madrid. **Improved Model to Predict Flexible Pavement Temperature Profile**. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (cedex), 2008. 14 p. Disponível em: <<http://dotapp7.dot.state.mn.us/research/pdf/2008MRRDOC032.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

LI, Yi et al. Effective temperature for predicting permanent deformation of asphalt pavement. **Construction And Building Materials Journal**. Web, p. 871-879. 15 dez. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.118>>. Acesso em: 19 ago. 2018.

LI, Yi; LIU, Liping; SUN, Lijun. Durability of Innovative Construction Materials and Structures Temperature predictions for asphalt pavement with thick asphalt layer. **Construction And Building Materials**. Web, p. 802-809. 30 jan. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.145>>. Acesso em: 21 ago. 2018.

MAGGIORE, Cinzia; AIREY, Gordon; GRENFELL, James. Evaluation of different fatigue failure criteria for asphalt using laboratory tests. In: 2ND MESAT INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ASPHALT PAVEMENTS IN THE MIDDLE EAST, 2., 2013, Sharjah. **Journal Article**. Sharjah: American University Of Sharjah, 2013. p. 1 - 11. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Cinzia_Maggiore/publication/309771066_Evaluation_of_different_fatigue_failure_criteria_for_asphalt_material_using_laboratory_tests/links/5822f01b08aeebc4f8982f00.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2018.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ufrj, 2005. 574 p.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 2014. 414 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <<https://www.capes.gov.br/images/stories/download/pct/mencoeshonrosas/226861.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

MINHOTO, Manuel Joaquim da Costa. **Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis**. 2005. 329 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, 2005. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1975/1/Tese_Doutoramento.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2018.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **O estudo da temperatura em revestimentos betuminosos**. 1979. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto

Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1979. Disponível em:
<<https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/2966>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

OTTO, Gustavo Garcia. **Misturas Asfálticas Mornas - Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em:
<<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/93302>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

PEREIRA, Geógia Geovania. **Influência da Temperatura na Resistência à Fadiga da Mistura Asfáltica e na Estimativa da Vida Útil do Pavimento: Abordagem da Energia Dissipada Acumulada e Fenomenológica..** 2017. 122 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PERON, André; MAAR, Alexander; NETTO, Fernando del Prá. **Santa Catarina: História, Espaço Geográfico e Meio Ambiente**. 2. ed. Florianópolis: Insular, 2011. 288 p.

PINTARELLI, Mariana Gaertner. **Comportamento de misturas asfálticas com relação ao fenômeno de fadiga: Estudo de comparação entre as normas ASTM D7460, AASHTO T321 E EN 12697-24**. 2017. 131 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em:
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/177256/TCC_Vers%C3%A3o%20Final_Mariana%20Gaer>. Acesso em: 21 nov. 2018.

PINTO, Salomão. **Estudo do comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. 1991. 478 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/135-1991/756-salomao-pinto>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

PINZON, Eduardo Alberto Castañeda. **Contribution de méthodes non destructives à l'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumin**. 2004. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Génie Civil, École Doctorale Mécanique, Thermique Et Génie Civil, Nantes, 2004. Disponível em: <<http://www.theses.fr/2004NANT2074>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

QUINTERO, Carlos Fernando Quintero. **Estudo de Misturas Asfálticas com Ligantes de Consistência Elevada: Formulação e Comportamento Mecânico**. 2011. 229 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em:
<<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/95636>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

QUINTERO, Carlos Fernando Quintero. **Influência da temperatura e da consistência do ligante na fadiga e no módulo complexo de misturas asfálticas**. 2016. 264 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em:
<<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/171461>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

RAMOS, Rubén Tino. **Influencia de los agentes externos sobre el comportamiento viscoelastoplástico de mezclas bituminosas para firmes de carreteras**. 2015. 309 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Construcción y Agronomía, Universidad de Salamanca, Salamanca, 2015. Disponível em: <<https://gredos.usal.es/jspui/handle/10366/129291>>. Acesso em: 21 ago. 2018.

SANTOS, Aline Selau. **Segmentos monitorados de Araranguá: construção e previsão de desempenho do revestimento em camadas singulares e integradas**. 2016. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/175853>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

SOLAIMANIAN, Mansour; KENNEDY, Thomas. Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation. **Transportation Research Board**. Washington D.c., p. 1-11. ago. 1993. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1417/1417-001.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (Usa). National Research Council (Ed.). **Strength and Deformation Characteristics of Pavement Sections and Pavement Rehabilitation**. Washington D.c: National Academy Press, 1993. 99 p.

YAVUZTURK, C.; KSAIBATI, K.; CHIASSON, A. D.. Assessment of Temperature Fluctuations in Asphalt Pavements due to Thermal Environmental Conditions using a Two-Dimensional, Transient Finite-Difference Approach. **Journal Of Materials In Civil Engineering, asce**. Virginia, p. 465-475. 01 ago. 2005.

APÊNDICE A – Dados meteorológicos de 07/11/2017 e 03/02/2018

A Tabela 12 apresenta os dados meteorológicos, coletados a cada hora pela estação automática de Araranguá e disponibilizados pelo INMET, utilizados no modelo de predição de temperatura interna do revestimento asfáltico.

Tabela 12: Dados meteorológicos de 07/11/2017 e 03/02/2018

Hora	Primavera - 07/11/2017			Verão - 03/02/2018		
	Temperatura do Ar (°C)	Radiação (kJ/m ²)	Velocidade do Vento (m/s)	Temperatura do Ar (°C)	Radiação (kJ/m ²)	Velocidade do Vento (m/s)
0:00	19,3	0	3,8	19,8	0	0,6
1:00	19,0	0	4,4	19,8	0	0,7
2:00	18,9	0	4,7	19,5	0	0,9
3:00	18,8	0	2,7	19,5	0	0,6
4:00	18,5	0	1,8	19,1	0	1,2
5:00	18,4	0	1,7	18,7	0	1,4
6:00	18,1	0	0,3	18,2	5,1	1,0
7:00	17,8	81,5	2,1	18,9	99,9	1,1
8:00	17,1	692,4	4,0	19,8	300,1	1,5
9:00	16,8	1537,9	4,6	22,3	970,6	2,0
10:00	18,6	2309,4	3,2	24,8	1604,0	3,1
11:00	21,0	2561,8	4,7	26,7	2384,0	3,4
12:00	22,4	2200,3	4,0	26,1	3366,0	4,2
13:00	23,1	1878,7	7,2	27,2	3791,0	3,6
14:00	23,7	1770,5	6,9	26,6	3595,0	4,1
15:00	24,5	2292,2	7,7	25,4	2645,0	4,8
16:00	23,9	2643,0	6,6	24,8	2565,0	5,2
17:00	24,3	2185,8	5,9	24,6	1780,0	5,2
18:00	24,2	1094,3	4,8	24,2	560,7	3,2
19:00	24,0	280,9	7,4	23,7	84,6	2,7
20:00	22,6	15,4	7,1	23,4	0	2,3
21:00	21,1	0	6,7	22,7	0	0,8
22:00	20,9	0	5,7	22,7	0	1,8
23:00	20,3	0	5,5	22,6	0	1,4

APÊNDICE B – Dados meteorológicos de 05/05/2018 e 08/08/2018

A Tabela 13 apresenta os dados meteorológicos, coletados a cada hora pela estação automática de Araranguá e disponibilizados pelo INMET, utilizados no modelo de predição de temperatura interna do revestimento asfáltico.

Tabela 13: Dados meteorológicos de 05/05/2018 e 08/08/2018

Hora	Outono - 05/05/2018			Inverno - 08/08/2018		
	Temperatura do Ar (°C)	Radiação (kJ/m ²)	Velocidade do Vento (m/s)	Temperatura do Ar (°C)	Radiação (kJ/m ²)	Velocidade do Vento (m/s)
0:00	21,8	0	1,2	11,0	0	0,7
1:00	20,3	0	1,0	10,1	0	0,5
2:00	19,8	0	0,4	9,0	0	1,1
3:00	19,9	0	0,9	8,2	0	0,8
4:00	20,9	0	0,6	7,8	0	0,7
5:00	20,7	0	0,4	7,8	0	0,8
6:00	20,5	0	1,2	7,6	0	0,5
7:00	20,3	11,9	0,7	6,7	5,5	0,4
8:00	21,0	233,7	0,3	9,3	360,0	1,5
9:00	22,8	805,5	0,6	12,0	1051,0	0,7
10:00	24,0	1375,0	0,7	14,3	1673,0	0,8
11:00	25,5	2065,0	1,1	16,5	2162,0	0,7
12:00	26,0	2091,0	2,7	17,9	2438,0	4,3
13:00	25,4	1352,0	3,2	17,5	2503,0	4,5
14:00	25,0	1153,0	3,8	17,4	2320,0	4,9
15:00	24,6	464,0	2,8	17,1	1893,0	4,6
16:00	24,3	296,1	3,2	16,9	1294,0	3,6
17:00	24,0	241,2	2,8	16,0	608,0	4,5
18:00	23,6	12,7	2,4	14,8	60,0	2,9
19:00	23,5	0	2,0	13,2	0	3,6
20:00	23,3	0	1,6	12,2	0	2,6
21:00	23,3	0	0,8	11,7	0	1,8
22:00	22,7	0	1,1	11,2	0	1,4
23:00	22,7	0	1,1	10,1	0	0,4